

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Gašparec

Zagreb, 2016. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Biserka Runje, dipl. ing.

Student:

Luka Gašparec

Zagreb, 2016. godina.

IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno, koristeći znanje stečeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, i navedenu literaturu.

Ovom prilikom zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Biserki Runje, te asistentici Amaliji Horvatić Novak, mag.ing.mech. na stručnoj pomoći i savjetima tijekom izvođenja ovoga rada.

Luka Gašparec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

| | |
|-------------------------------------|-------------------|
| Sveučilište u Zagrebu | |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | 07-07-2016 Prilog |
| Klasa: | 002-04/16-6/3 |
| Ur.broj: | 15-1703-16-259 |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LUKA GAŠPAREC**

Mat. br.: 0035185237

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PRIMJENA PLANOVA POKUSA U CILJU PROCJENE SASTAVNICA MJERNE NESIGURNOSTI**

Naslov rada na engleskom jeziku: **THE APPLICATION OF DESIGN OF EXPERIMENTS IN ESTIMATING MEASUREMENT UNCERTAINTY COMPONENTS**

Opis zadatka:

Kroz koncept planiranja pokusa potrebno je utvrditi funkcijski odnos odabranih utjecajnih parametara na rezultate mjerenja kod primjene računalne tomografije (engl. Computed Tomography - CT) u dimenzionalnom mjeriteljstvu. Kako se radi o složenom mjernom sustavu s velikim brojem ulaznih veličina, u radu je potrebno opisati i optimirati odabrane značajke CT mjernog sustava. Procjenu mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja je potrebno provesti sukladno novoj reviziji Vodiča za procjenu mjerne nesigurnosti JCGM 100:201X CD.

U tekstu diplomskog rada potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć pri izradi.

Zadatak zadan:
5. svibnja 2016.

Rok predaje rada:
7. srpnja 2016.

Predviđeni datum obrane:
13., 14. i 15. srpnja 2016.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Biserka Runje

Prof. dr. sc. Franjo Čajner

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| IZJAVA..... | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | IV |
| POPIS OZNAKA | V |
| SAŽETAK..... | VI |
| SUMMARY | VII |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. RAČUNALNA TOMOGRAFIJA (CT)..... | 2 |
| 2.1 Općenito..... | 2 |
| 2.2 Princip rada..... | 3 |
| 2.3 Spektar zraka | 4 |
| 2.4. Prednosti sustava | 5 |
| 2.5 Nedostaci sustava | 6 |
| 3. MJERNA SLJEDIVOST..... | 7 |
| 3.1 Mjerna nesigurnost | 8 |
| 4. UTJECAJNI PARAMETRI XCT SUSTAVA..... | 10 |
| 4.1 Izvor rendgenskih zraka..... | 12 |
| 4.1.1 Veličina žarišta..... | 12 |
| 4.1.2 Snaga snopa rendgenskih zraka | 13 |
| 4.2 Postolje za mjerenje i rotacijski stol | 16 |
| 4.3 Predmet mjerenja | 17 |
| 4.3.1 Prigušenje..... | 17 |
| 4.3.2 Očvršćivanje snopa zrake..... | 18 |
| 4.3.3 Raspršena radijacija | 19 |
| 4.3.4 Sastav materijala | 19 |
| 4.3.5 Hrapavost površine | 19 |
| 4.4 Detektor za sakupljanje snopa zrake | 20 |
| 4.5 Obrada računalom..... | 20 |
| 4.6 Mjeritelj | 21 |
| 4.6.1 Geometrijsko povećanje..... | 22 |
| 4.6.2 Postavljanje predmeta mjerenja | 22 |
| 4.6.3 Broj projekcija | 23 |

| | |
|---|----|
| 4.7 Okoliš..... | 24 |
| 5. SUSTAVNE GREŠKE XCT SUSTAVA | 26 |
| 5.1 Pomak pri strujanju snopa zrake..... | 26 |
| 5.2 Prstenasti artefakti | 27 |
| 5.3 Efekt očvršćivanja snopa zraka | 28 |
| 5.4 Artefakti djelomičnog volumena | 31 |
| 6. EKSPERIMENTALNI DIO RADA | 32 |
| 6.1 Djelomični plan pokusa | 32 |
| 6.1.1 Frakcionalna replikacija 2^k plana pokusa..... | 32 |
| 6.1.2 Polovina (eng. One half fraction) 2^k plana pokusa | 33 |
| 6.1.3 Manje frakcije: 2^{k-p} djelomični plan pokusa..... | 37 |
| 6.2 Usporedba različitih metoda primjene planova pokusa..... | 39 |
| 6.2.1 Opis mjerenja i rezultati potpunog plana pokusa..... | 39 |
| 6.2.2 Opis mjerenja i rezultati djelomičnog plana pokusa..... | 42 |
| 6.2.3 Usporedba rezultata potpunog i djelomičnog plana pokusa | 44 |
| 6.3 Primjena djelomičnog plana pokusa sa ciljem procjene sastavnice mjerne nesigurnosti | 45 |
| 6.3.1 Oblikovanje plana pokusa..... | 48 |
| 6.3.2 Statistička analiza..... | 51 |
| 6.3.3 Procjena sastavnice standardne nesigurnosti rezultata mjerenja..... | 54 |
| 7. ZAKLJUČAK | 59 |
| LITERATURA..... | 60 |
| PRILOZI..... | 62 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Princip rada | 3 |
| Slika 2. Elektromagnetski spektar | 4 |
| Slika 3. Prednosti CT uređaja | 5 |
| Slika 4. Nedostaci CT uređaja | 6 |
| Slika 5. Parametri koji utječu na mjernu sljedivost | 7 |
| Slika 6. Prikaz utjecajnih parametara na CT uređaju | 11 |
| Slika 7. Mala veličina žarišta (lijevo) u usporedbi sa većim (desno) žarištem [12] | 12 |
| Slika 8. Utjecaj jakosti struje na intenzivnost [3] | 13 |
| Slika 9. Utjecaj jakosti napona na intenzivnost [3] | 14 |
| Slika 10. Prikaz izveden sa 225 kV [5] | 14 |
| Slika 11. Prikaz izveden sa 450 kV [5] | 14 |
| Slika 12. Pomak detektora u odnosu na centralnu os [3] | 16 |
| Slika 13. Koeficijent prigušenja za različite razine energije fotona | 17 |
| Slika 14. Utjecaj uvećanja na pojavu zamagljenja na skenu [3] | 23 |
| Slika 15. Utjecaj temperature na stabilnost materijala mete [3] | 24 |
| Slika 16. Prikaz refleksije kod rendgenske cijevi [12] | 26 |
| Slika 17. Prikaz prstenastog artefakta [12] | 27 |
| Slika 18. Prikaz uklonjenog prstenastog artefakta [12] | 27 |
| Slika 19. Prikaz prodiranja rendgenskih zraka na uzorku različite debljine [12] | 28 |
| Slika 20. Prikaz prstenastog i metalnog (streak) artefakta [12] | 29 |
| Slika 21. Učinak očvršćivanja snopa zrake na prikazu bez filtriranja (lijevo) te na prikazu sa bakrenim filterom debljine 1mm (desno) [12] | 29 |
| Slika 22. <i>Cupping</i> zbog očvršćivanja snopa zrake | 30 |
| Slika 23. Primjer parcijalnih artefakata | 31 |
| Slika 24. Polovina frakcije 2^3 plana pokusa | 33 |
| Slika 25. Prikaz djelomičnog plana pokusa sa rezultatima mjerenja | 42 |
| Slika 26. Podložna pločica, lijeva slika (unutarnji promjer D), te desna slika (debljina pločice d) | 47 |
| Slika 27. Plan pokusa potreban za mjerenja na CT uređaju | 48 |
| Slika 28. Rezultati mjerenja prikazani u softveru <i>Design Expert 7</i> | 49 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Tablica plus i minus znakova za 2^3 plan pokusa | 33 |
| Tablica 2. Stvaranje primarne frakcije | 36 |
| Tablica 3. Pseudonim struktura | 38 |
| Tablica 4. Promatrani parametri MAG zavarivanja | 40 |
| Tablica 5. Analiza varijance potpunog plana pokusa | 41 |
| Tablica 6. Analiza varijance djelomičnog plana pokusa | 43 |
| Tablica 7. Rezultati usporedbe različitih metoda planova pokusa | 44 |
| Tablica 8. Konstantne vrijednosti u procesu mjerenja | 46 |
| Tablica 9. Vrijednosti ulaznih faktora | 47 |
| Tablica 10. Rezultati mjerenja podložne pločice | 48 |
| Tablica 11. Razlika vrijednosti unutarnjeg promjera u odnosu na vrstu materijala | 50 |
| Tablica 12. Razlika vrijednosti debljine u odnosu na vrstu materijala | 50 |
| Tablica 13. Analiza varijance za unutarnji promjer pločice | 51 |
| Tablica 14. Analiza varijance za debljinu pločice | 52 |
| Tablica 15. Značajnost modela za mjerenje unutarnjeg promjera i debljine pločice | 53 |
| Tablica 16. Statistički prikaz rezultata mjerenja unutarnjeg promjera pločice | 56 |
| Tablica 17. Statistički prikaz rezultata mjerenja debljine podložne pločice | 57 |
| Tablica 18. Sastavnica standardne nesigurnosti rezultata mjerenja | 58 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|-------------|------------------|---|
| U | V | Napon izvora |
| I | A | Struja izvora |
| P | W | Snaga izvora |
| FDD | / | Udaljenost između izvora rendgenske zrake i detektora |
| FOD | / | Udaljenost između izvora rendgenske zrake i predmeta mjerenja |
| T | °C | Temperatura |
| E | keV ¹ | Energija |
| \bar{x} | mm | Srednja vrijednost skupa podataka |
| s_i | mm | Standardno odstupanje skupa podataka |
| $u(x_i)$ | mm | Standardna nesigurnost skupa podataka |
| n | | Broj mjerenja u pokusu |
| Q | kJ/cm | Iznos topline |
| ϑ | °C | Temperatura predgrijavanja |
| KV | J | Udarni rad loma metala zavara |

¹ keV (*kiloelektronvolt*) - Elektronvolt (eV) je mjerna jedinica za energiju, korištena u atomskoj i molekularnoj fizici. Definirana je kao kinetička energija koju primi elektron kada je ubrzan električnim poljem kroz potencijalnu razliku od 1 V (volt) u vakuumu. Nije osnovna mjerna jedinica u međunarodnom sustavu mjernih jedinica i njena vrijednost se mora dobiti pokusima.

SAŽETAK

Tema diplomskog rada je primjena planova pokusa u cilju procjene sastavnica mjerne nesigurnosti.

U diplomskom radu detaljno je opisan rad CT uređaja koji se koristi u području dimenzionalnog mjeriteljstva, rekonstrukcija prikaza, utjecajni parametri, te greške sustava.

Eksperimentalni dio rada se sastoji od dva dijela. U prvom dijelu rada se izvršila usporedba različitih metoda planova pokusa, dok se u drugom dijelu izvršila primjena djelomičnog plana pokusa u cilju procjene sastavnice mjerne nesigurnosti.

Pri mjerenju specificiranog predmeta mjerenja, koristila se metoda djelomičnog plana pokusa. Metoda djelomičnog plana pokusa osigurava minimalan utrošak vremenskih i financijskih resursa.

Ključne riječi: računalna tomografija, utjecajni parametri, djelomični plan pokusa, dimenzionalno mjeriteljstvo, mjerna nesigurnost

SUMMARY

The subject of this graduate thesis is the application of design of experiments in estimating measurement uncertainty components.

This thesis describes scanning of an object using an industrial CT scanner, reconstruction of scanned images, influence factors and its system defects in details.

Experimental part of the thesis contains two parts. The first part contains a comparison of different design of experiments methods. The second part contains a estimation of measurement uncertainty components with the application of a fractional design experiment.

A fractional design of experiments method was used for planning the measurement procedure of a specified object. Fractional design of experiments method ensures significant reduction in financial and time resources needed for the experiment.

Key words: computer tomography, influence factors, fractional design of experiments, dimensional measurement, measurement uncertainty

1. UVOD

Proces stvaranja prikaza predmeta pomoću generiranja rendgenskih zraka prilikom dimenzionalnog mjeriteljstva zahtijeva odabir velikog broja parametara. Parametara poput odabira razine napona i struje izvora, vremena izlaganja zračenju, predmeta mjerenja (materijal, geometrija), broju projekcija, povećanju itd.

U ovom radu se namjerava istražiti utjecaj tih parametara na konačni rezultat dimenzionalnog mjerenja. S obzirom da je broj utjecajnih parametara veoma velik, odabran je manji broj parametara na koje će se pokus odnositi.

Rad se sastoji od dva dijela: teoretskog i eksperimentalnog dijela. U teoretskom dijelu pored sažetog opisa i definicije same tehnologije računalne tomografije, te principa rada uređaja korištenog pri mjerenju, opisat će se i glavne prednosti i nedostaci tehnologije.

Izostanak mjerne sljedivosti rezultata je uzrokovan postojanjem mjerne nesigurnosti, te posljedično utječe na nedostatak kvalitetnih zaključaka provedenih mjerenja.

Eksperimentalni dio rada će se obavljati pomoću softvera *DX7 Trial*. Predmet mjerenja je podložna pločica.

Za pokus su odabrani sljedeći parametri: materijal predmeta mjerenja; konkretno mesing i čelik, udaljenost predmeta od izvora, te broj odabranih projekcija prilikom mjerenja. Utjecaj tih ulaznih veličina će se promatrati na izlaznim veličinama mjerenja poput unutarnjeg promjera, te debljine mjerenog predmeta (podložne pločice).

U ovakvom ranom stadiju eksperimentalnog rada, kada je vjerojatna prisutnost velikog broja faktora (ulaznih i izlaznih) primjenjuju se planovi pokusa. Metode planiranja pokusa se koriste u svrhu dobivanja što više informacija o istraživanom sustavu uz minimalan eksperimentalan i financijski angažman [6].

Konkretno, u ovom slučaju koristiti će se metoda djelomičnog plana pokusa koja pruža velike uštede ljudskih, vremenskih i financijskih resursa.

2. RAČUNALNA TOMOGRAFIJA (CT)

2.1 Općenito

Računalna tomografija se danas koristi najviše u trima područjima: medicini, ispitivanju materijala, te dimenzijskom mjeriteljstvu. U medicini se počela koristiti tijekom 1970-ih godina, ističe se informacija o prvom izgrađenom skeneru 1969. godine od strane nobelovca Godfrey N. Hounsfield-a i Allan M. Cormack-a, te prvog izvedenog skeniranja mozga dvije godine kasnije [2].

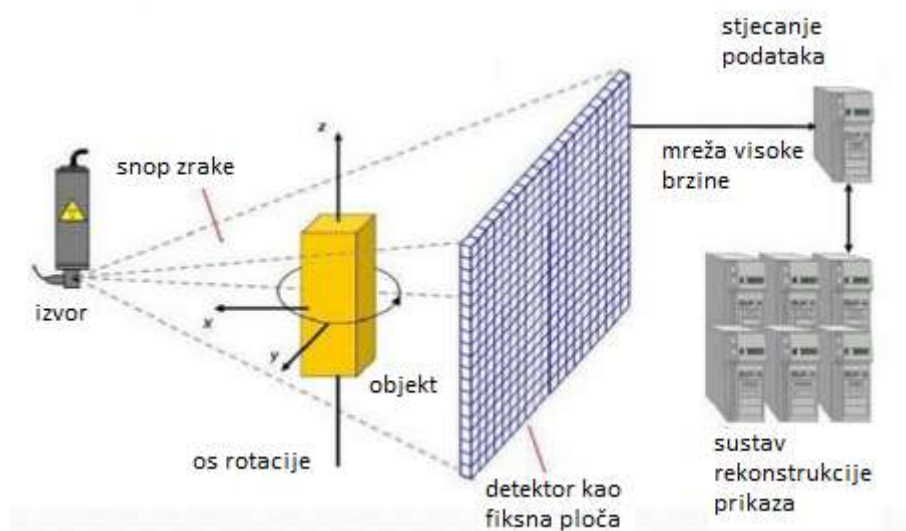
Prva raširena uporaba u područjima ispitivanja materijala i dimenzionalnog mjeriteljstva datira početkom 1980-ih godina prošlog stoljeća. Dok prvi pokušaji korištenja tadašnjih CT skenera datiraju iz 1991. godine. Razlog prednosti uporabe računalne tomografije u područjima ispitivanja materijala, te dimenzionalnog mjeriteljstva je jednostavan. Tomografija pruža mogućnost promatranja i analize, kako vanjskih dimenzija predmeta mjerenja, tako i unutarnjih dimenzija, tj. onih teže dostupnih, bez upotrebe destruktivnih metoda ispitivanja. Također, prilikom upotrebe takve metode, jednostavno se može uočiti bilo kakav nedostatak materijala (defekt). Takav način upotrebe je suprotan metodama mjerenja dimenzija poput 3D mjernih uređaja sa koordinatnim osima, robotskim rukama za mjerenje itd. Tek 2005. godine dolazi do važnog uspjeha, proizvodnje prvog specijaliziranog CT uređaja za dimenzionalno mjeriteljstvo koji je uspješno uklonio nedostatke prije korištenih uobičajenih CT skenera. CT metoda jedina omogućuje uvid u unutarnji i vanjski izgled predmeta mjerenja bez njegova razaranja. Svojim značajkama donosi prednosti u područjima poput kontrole kvalitete proizvoda, kompleksne unutarnje geometrije, sastavljenih od više materijala i slično. Njen način rada mjerenja bez ostvarivanja fizičkog kontakta predstavlja i uspjeh kod mjerenja i provjere proizvoda sastavljenih od više dijelova, gdje dimenzije individualnog i sastavljenog dijela mogu varirati.

S obzirom da govorimo o relativno novoj tehnologiji, njena iskoristivost nije do kraja istražena. Za razliku od primjene u medicini, primjena u dimenzionalnom mjeriteljstvu zahtijeva velike razine snage prodiranja zračenja, te visoku prostornu rezoluciju, što su značajke posebice potrebne kod rada sa predmetima izrađenim od materijala velike gustoće i debljine [1].

2.2 Princip rada

U principu, izvor rendgenskih zraka stvara snop zrake emitiranih fotona koje putuju prema predmetu mjerenja. Predmet mjerenja se nalazi na rotacijskom stolu gdje je u konstantnoj rotaciji. Takvim pristupom postiže se ozračivanje predmeta iz svih mogućih položaja i kuteva rotacije. Cilj stvaranja snopa rendgenske zrake je njihov prolazak kroz predmet mjerenja do detektora na drugoj strani. Prilikom rada, kroz predmet ne prolaze sve zrake. Ne prolaze zrake koje su raspršene, te zrake koje su apsorbirane od strane predmeta. Takav proces se naziva proces prigušenja ili proces atenuacije. Kao posljedica pojavljuje se smanjenje intenziteta ulaznih rendgenskih zraka [3].

Zadaću skupljanja zraka fotona koje su ozračile i prošle predmet obavlja detektor. Prikaz snimljenih pozicija rezultira dvodimenzionalnom slikom (2D) predmeta prikazanom na računalu. Nakon što su prikazi dobiveni od detektora za svaku rotacionu poziciju, skup prikaza prolazi kroz niz računalnih operacija koje pretvaraju informaciju u voksele. Obrada podataka se sastoji od dva koraka: prvo rekonstrukcija 2D prikaza u 3D vekslel model prikaze, te drugo provođenje mjerenja. Kao konačni rezultat obrade dobiva se 3D prikaz predmeta s provedenim mjerenjem dimenzija prikazanim na ekranu računala.

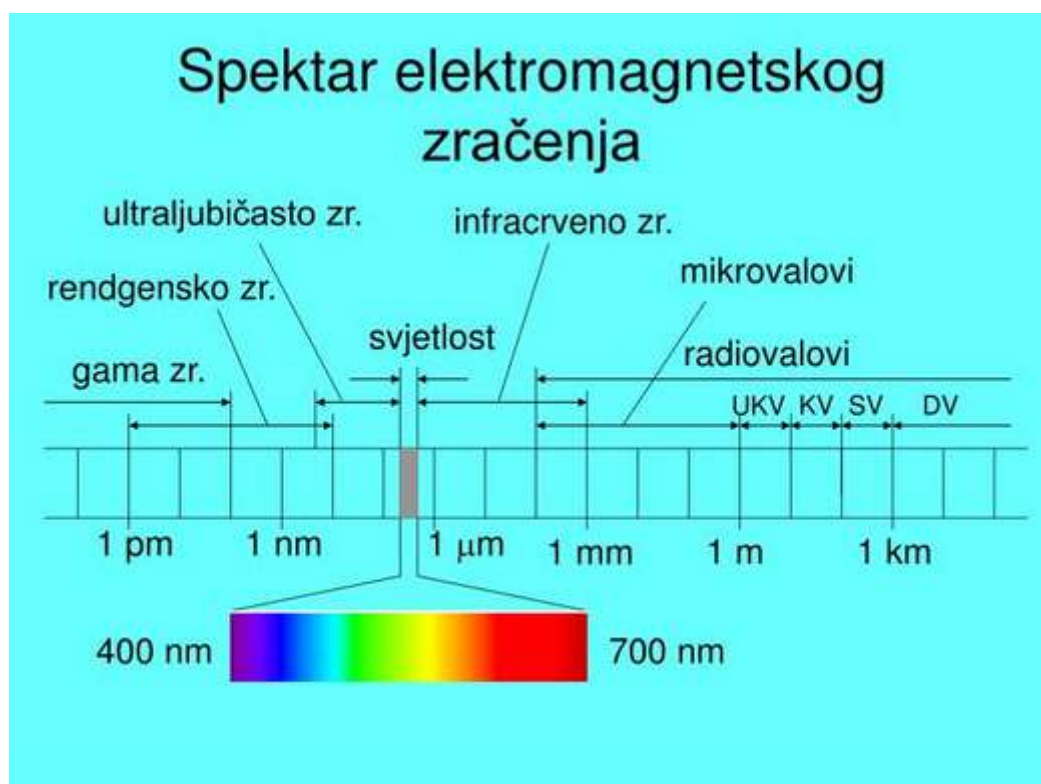


Slika 1. Princip rada

2.3 Spektar zraka

XCT sustavi se oslanjaju na korištenje rendgenskih zraka za stvaranje prikaza predmeta. Rendgenske zrake su oblik elektromagnetske radijacije sa dosegom valne duljine otprilike od 10 nm do 0,01 nm te energijom fotona od 0,12 keV do 120 keV.

Rendgenske zrake se dijele na dvije kategorije: rendgenske zrake niske energije (eng. *soft*) sa dosegom razine energije od 0,12 keV do 12 keV, te rendgenske zrake visoke energije (eng. *hard*) dosega energije od 12 keV do 120 keV. Porast napona rendgenske cijevi povišuje energiju svakog emitiranog fotona. Porast razine električne struje povišuje broj generiranih fotona rendgenske zrake. Energija fotona rendgenske zrake određuje njegovu sposobnost probijanja (*penetracije*), dok količina određuje izloženost radijaciji. Rendgenske zrake niske energije se uobičajeno nazivaju neprobijajuće i uklanjaju se postavljanjem filtera, većinom materijala poput aluminijske folije.



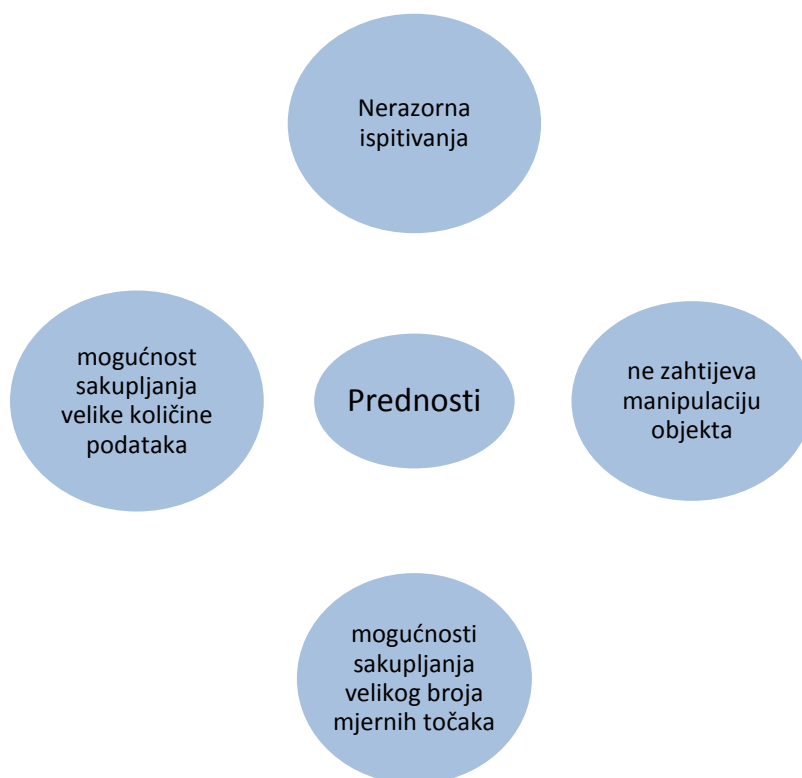
Slika 2. Elektromagnetski spektar

2.4. Prednosti sustava

Glavna prednost primjene CT uređaja je mogućnost određivanja unutarnje geometrije predmeta mjerenja bez razaranja integriteta i strukture istog predmeta. Usprkos mogućnosti sakupljanja ogromne količine podataka, CT uređaj i dalje pruža veoma zadovoljavajuće performanse u pogledu trajanja vremena ozračivanja predmeta od strane uređaja.

Prednosti se očituju i u pogledu jednostavnih operacija poput učvršćivanja predmeta mjerenja na stolu za mjerenje. Prilikom konvencionalnog stezanja predmeta stezaljkama uvijek postoji mogućnost minornog oštećenja istog.

Mogućnost sakupljanja velike količine podataka omogućuje korisniku precizniju i detaljniju analizu sakupljenih informacija. Pored mogućnosti sakupljanja velikog broja mjernih točaka te time osiguravajući veće izgleda za precizniji rezultat, CT uređaj također ne zahtijeva čestu manipulaciju predmeta. Jednom kada se predmet pravilno učvrsti i utvrdi na postolju, nema potrebe za njegovim pomakom. Nasuprot tome, kod koordinatnih mjernih uređaja je nužno mjerenje predmeta na različitim pozicijama.



Slika 3. Prednosti CT uređaja

2.5 Nedostaci sustava

Primjena CT metode u dimenzionalnom mjeriteljstvu pruža više prednosti nego nedostataka, međutim postojeći nedostaci, od kojih je glavni nedostatak izostanak mjeriteljske sljedivosti rezultata do jedinice metra, čini ovu metodu još uvijek neraširenom u području dimenzionalnog mjerenja. Upravo iz tog razloga, osiguravanje sljedivosti, a povezano s time, procjena mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja, prioritet su u području istraživanja ove metode.

Nedostatak usklađenih standarda, te testnih procedura znatno utječe na mogućnosti usporedbe, te eventualno poboljšanje tehnologije. U ovoj fazi tehnologije potrebno je odobrenje znanstvene zajednice koje se postiže usporedbom, ne samo rezultata mjerenja CT uređaja sa rezultatima mjerenja tehnologija drugačijeg principa rada, već i usporedbom CT uređaja različitih proizvođača. Rezultat svega je konfuzija među provoditeljima testiranja. Nastavljajući takvom praksom rada, provoditelji testiranja ne smiju isključiti utjecaj niti jednog parametra. Samom tom činjenicom njihov broj je velik. Također, neka mjerenja su pokazala da mjerenje karakteristika oblika i položaja predmeta predstavlja kompliciraniju zadaću nego mjerenje samih dimenzija predmeta [16].

Naravno i neke već spomenute prednosti nose sa sobom ograničenja. Mogućnost sakupljanja znatne količine podataka zahtijeva i zadovoljavajuću računalnu opremu. Usprkos ekspanziji kapaciteta računalne tehnologije, čak i ona nailazi na svoje limite. Rezultat je zagušenje procesa tj. zbog velikog toka podataka, CT uređaj, čiji je obrada računalom dio, ne pruža zadovoljavajuće performanse rada.



Slika 4. Nedostaci CT uređaja

3. MJERNA SLJEDIVOST

Prema standardu JCGM 200:2008, mjeriteljska sljedivost je svojstvo mjernog rezultata kojim se taj rezultat dovodi u vezu s navedenom referencijom dokumentiranim neprekinutim lancem umjeravanja, od kojih svako doprinosi utvrđenoj mjernoj nesigurnosti [4].



Slika 5. Parametri koji utječu na mjernu sljedivost

Jednostavnije rečeno, potrebno je osigurati sljedivost iznosa rezultata mjerenja do referencijskog etalona predmeta mjerenja. Prvi korak u utvrđivanju mjerne sljedivosti rezultata je utvrđivanje preciznog iznosa utjecaja svakog od promatranih parametara na CT mjerenje. Što je veći broj parametara, to je veći broj nepoznanica u mjerenju, što pridonosi velikom iznosu mjerne nesigurnosti.

3.1 Mjerna nesigurnost

Mjerna nesigurnost opisuje kvalitetu izvršenog mjerenja. Kada govorimo o mjernoj nesigurnosti govorimo o izračunu ukupne mjerne nesigurnosti. To znači da ne postoji samo jedan parametar koji utječe na njenu veličinu. Ustvari, izračun ukupne mjerne nesigurnosti predstavlja značajan problem baš zbog velikog broja potencijalnih utjecajnih parametara. Kao što je već rečeno, rezultat mjerenja predodčen bez njegove mjerne nesigurnosti, ne predstavlja kvalitetno izvedeno mjerenje, tj. ne osigurava mjernu sljedivost do osnovnih jedinica SI sustava.

Prvi korak za određivanje mjerne nesigurnosti je određivanje referentne vrijednosti. Referentna vrijednost je ona vrijednost u odnosu na koju određujemo mjernu nesigurnost našeg rezultata mjerenja. Jedan od načina njenog određivanja je pomoću korištenja ticala. No, njena učinkovitost prikaza stanja površine je upitna zbog utjecaja vrha ticala, te posljedičnog pomaka profila.

S obzirom da ne postoje ustanovljeni međunarodni standardi niti priručnici u svezi procjene mjerne nesigurnosti specifičnog slučaja mjerenja, mjeritelj može izabrati između nekoliko opcija.

Najraširenija metoda je metoda korištenja priručnika za izražavanje mjerne nesigurnosti (*GUM- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*), te teorije propagacije pogreške. Takva metoda zahtijeva evaluacijski model koji predviđa učinak utjecaja svakog od ulaznih parametara mjerenja. S obzirom da je utjecaj parametara još poprilično nepoznat i daleko od preciznog kvantitativnog rezultata, te imajući na umu čestu specifičnost pojedinih mjerenja u dimenzionalnom mjeriteljstvu, jasno je da je takav model često upotrebljiv samo u najjednostavnijim slučajevima [8].

Postoje načini utvrđivanja nesigurnosti koji djeluju učinkovitije u slučajevima utvrđivanja utjecaja velikog broja parametara. Jedan od takvih načina je izvođenje varijabilnih simulacija gdje naglasak nije na analitičkim modelima, već na mjerenju što većeg broja simuliranih uzoraka u isto tako simuliranim uvjetima.

Način sličan prethodno opisanome, je definitivno eksperimentalna metoda kalibriranog predmeta. Kalibrirani predmet je predmet koji je svojom geometrijom, materijalom, veličinom sličan stvarnom predmetu koji se mjeri. Metoda se sastoji od izvođenja mjerenja na kalibriranom predmetu u sekvenci ponovljivih mjerenja, naravno poštivanjem istih uvjeta i strategije korištene pri primarnom mjerenju.

Nedostaci metode su veliki utrošak vremena, te uvođenje novog varijabilnog faktora, tj. kalibracije predmeta gdje se mora uzeti u obzir i mogućnost varijacije njegovih dimenzija i geometrije. Kod slučaja računanja unutarnje geometrije predmeta, razmatra se korištenje slične metode segmentiranog kalibriranog predmeta.

Prednost eksperimentalnog načina u odnosu na simulacijski je u tome da kod eksperimentalnog nije potrebno znati individualan učinak promatranog utjecaja. Također ne isključuje se mogućnost kombinacije više načina određivanja referentne vrijednosti.

Kombinacija prednosti simulacijskog modela poput mogućnosti relativno brzog izvođenja mjerenja kalibriranog predmeta, uz spomenute značajke eksperimentalnog načina, osigurava učinkovitiji pristup.

Vrsta materijala predmeta, geometrija predmeta, postavke izvora rendgenske zrake, okoliš, mjeritelj, te odabir strategije mjerenja su samo neki od utjecaja koji će biti pobliže opisani u daljnjem tekstu.

Također ne smije se zanemariti ni utjecaj odabira CT uređaja od različitih proizvođača, te činjenicu da je stav nekih postojećih standarda i priručnika kontradiktoran u svezi uključenja nepoznatih sustavnih greški.

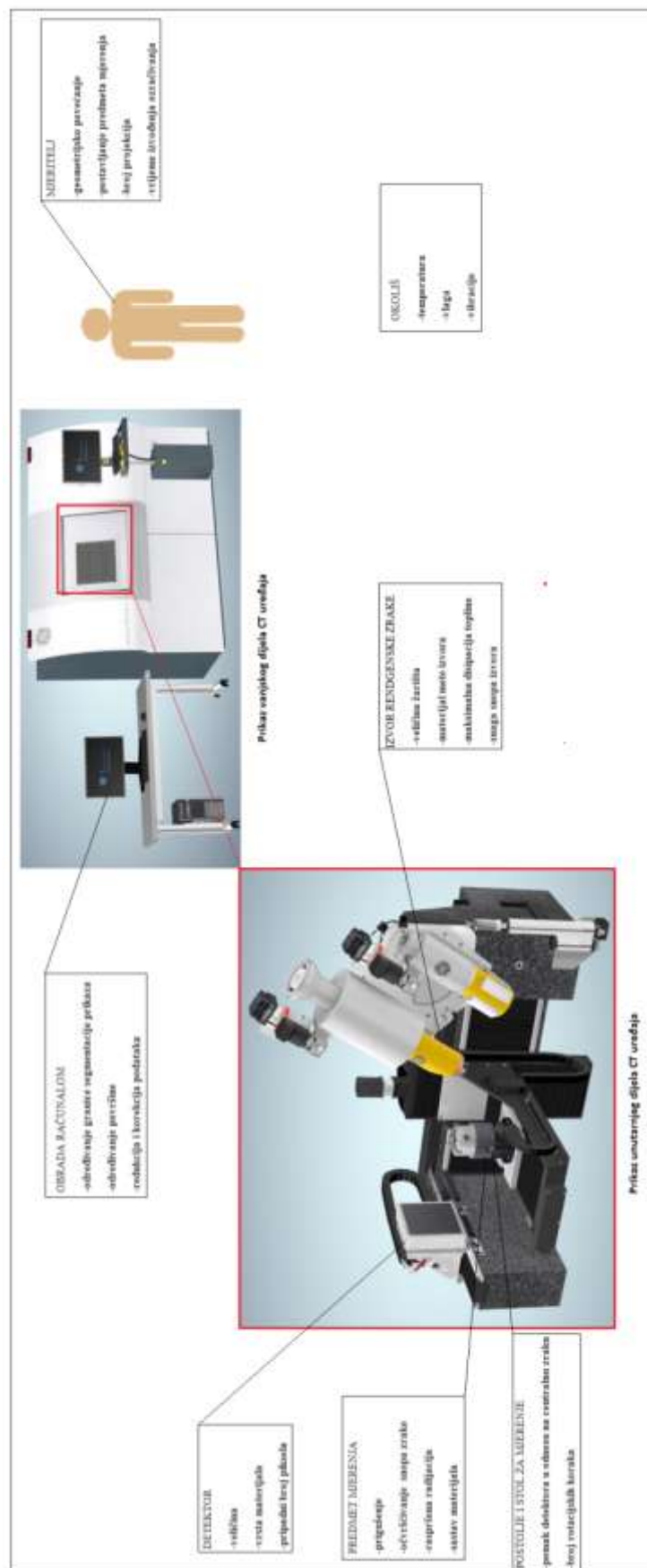
4. UTJECAJNI PARAMETRI XCT SUSTAVA

Postoje više načina klasifikacije utjecajnih parametara pri dimenzionalnom mjeriteljstvu [5].

U sljedećem tekstu podjela parametara je prikazana prema glavnim dijelovima CT uređaja: izvor rendgenske zrake, rotacijski stol i postolje za mjerenje, predmet mjerenja, detektor, obrada računalom, mjeritelj, te okoliš.

Sljedeća slika opisuje sve poznate parametre koji utječu na rad CT uređaja.

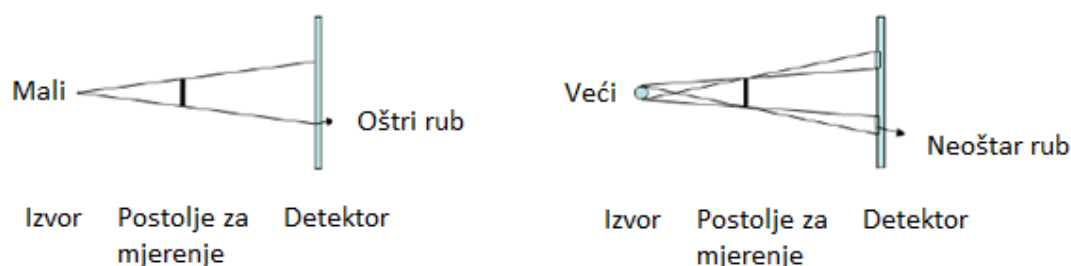
Slika 6. Prikaz utjecajnih parametara na CT uređaju



4.1 Izvor rendgenskih zraka

4.1.1 Veličina žarišta

Veličina žarišta utječe na prostornu rezoluciju CT prikaza. I pristup korištenja manje i pristup korištenja većeg žarišta imaju svoje prednosti i nedostatke. Njihov utjecaj na prikaz predmeta mjerenja tj. na prikaz njegovih rubova vidljiv je na slici.



Slika 7. Mala veličina žarišta (lijevo) u usporedbi sa većim (desno) žarištem [12]

Pristup s manjom veličinom žarišta će pružiti prikaz s oštrijim rubovima, dok će veće žarište pružiti mutni prikaz. Takav efekt mutnog prikaza se naziva efekt polusjene (eng. *penumbra effect*). No, i manje žarište ima svoju boljku.

U radu uređaja koji uključuje generiranje rendgenskih zraka, pojavljuju se velike količine topline. Konkretno, prilikom pretvorbe kinetičke energije u termalnu i elektromagnetsku, anoda izvora rendgenske zrake mora biti hlađena vodom. Razlog je gotovo 98 % -tna pretvorba spomenutih energija u toplinsku energiju. Mala veličina žarišta još više doprinosi utjecaju topline na metu, tj. njezin materijal. Svojim oblikom ona omogućuje još veće centriranje generirane energije. Zato je potrebno odabrati materijal mete otporan takvom toplinskom opterećenju, uz prisustvo opcije hlađenja materijala. Također, postojanje tolike količine generirane energije će limitirati opcije mjeritelja prilikom izbora željene razine napona pri izvoru, te posljedično snage izvora.

4.1.2 Snaga snopa rendgenskih zraka

Primjena odgovarajuće vrijednosti struje i napona ovisi o materijalu, gustoći, veličini te geometriji mjerenog predmeta [5].

Snaga izvora rendgenske zrake je važan utjecajni parametar. Snaga ovisi o jakosti električne struje i naponu odabranima od strane mjeritelja za generiranje rendgenskih zraka. Snaga je opisana sljedećim izrazom :

$$P = U * I, W \quad (1)$$

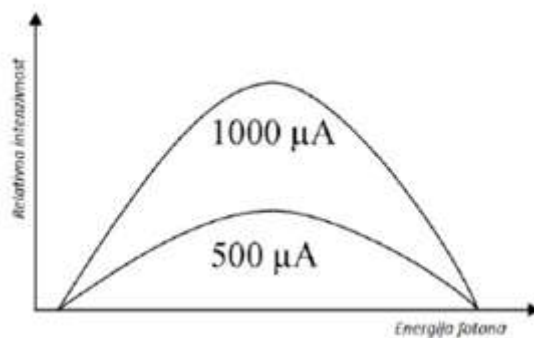
Gdje je :

P – snaga izvora

U – napon

I – jakost struje

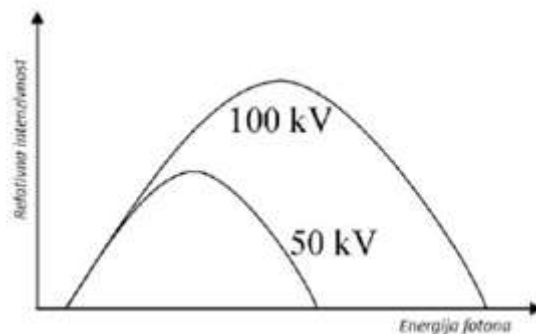
Jakost električne struje utječe na intenzitet zračenja, tj. količine energije radijacije. Jakost električne struje (μA) jednaka je brzini prijenosnika naboja (npr. elektronima) koji teku od vlaknastog izvora do mete.



Slika 8. Utjecaj jakosti struje na intenzivnost [3]

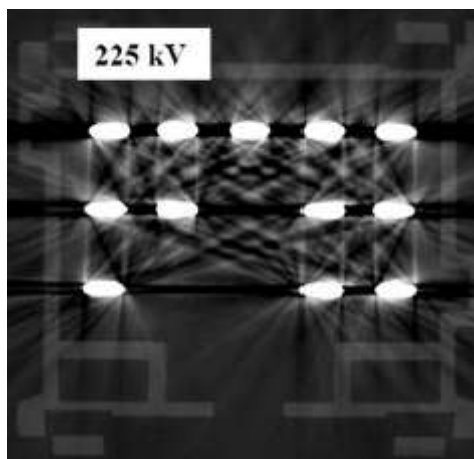
Slika pokazuje da udvostručenje razine vrijednosti jakosti struje udvostručuje energiju fotona spektra zračenja.

Primijenjeni napon utječe na povećanje prodornosti snopa rendgenskih zraka, te utječe na raspodjelu energije (maksimalni napon, kvalitetu, prodiranje).



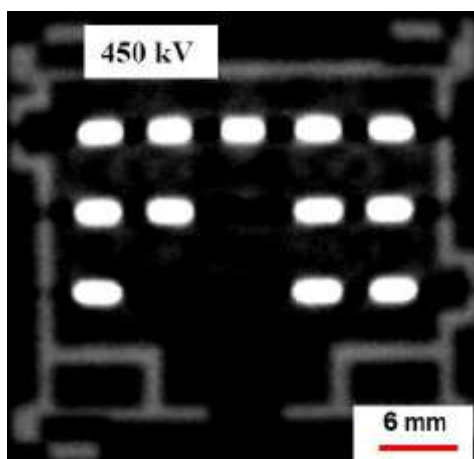
Slika 9. Utjecaj jakosti napona na intenzivnost [3]

Napon utječe na oboje, i intenzitet zračenja, i distribuciju energije. Pred nama je i primjer utjecaja visine vrijednosti napona na prikaz utikača izrađenog od dvaju različitih materijala (metal i polimer). Svaka primjena donosi svoje prednosti, no postoje i nedostaci. Prikaz sa 225 kV (donja slika) zbog manjeg žarišta daje sliku veće rezolucije (više detalja), no zbog pojave dvaju različitih materijala očita je pojava artefakata.



Slika 10. Prikaz izveden sa 225 kV [5]

Dok prikaz sa 450 kV (donja slika) donosi manje artefakata, no isto tako prikaz je očito niže rezolucije zbog većeg žarišta.



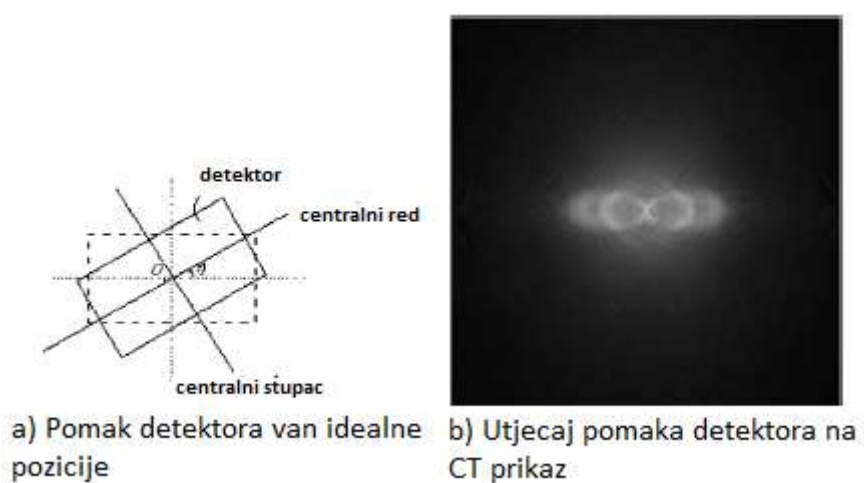
Slika 11. Prikaz izveden sa 450 kV [5]

Odabir konstantne primijenjene vrijednosti struje i napona predstavlja problem kod specifičnog mjerenja. Najčešće su problematična mjerenja predmeta neravnomjerne debljine (debljina znatno veća na jednom rubu predmeta od drugog ruba), predmeta sastavljenih od više materijala, te predmeta sa produženom i kompleksnom unutarnjom i vanjskom geometrijom. Pri takvim mjerenjima javljaju se problemi nestanka snopa zrake na jednoj strani (strana veće debljine), kao i gubitka kontrasta, te pojave zasićenja detektora na drugoj strani (strana manje debljine). Naravno, rješenje bi bilo izvođenje procesa na različitim vrijednostima struje i napona za određeni dio predmeta, no trenutni razvijeni simulacijski programi su naišli na zapreke u primjeni kod specifičnih predmeta. Zapreke poput ponekad prekompleksne geometrije predmeta, nedostatka informacija u vezi spektra zračenja izvora, te nepostojanje kvantitativnog načina određivanja efekta raspršenja zraka [1].

4.2 Postolje za mjerenje i rotacijski stol

U idealnoj sustavnoj geometriji centralna zraka putuje iz izvora rendgenske zrake, u ravnoj putanji siječe vertikalnu os rotacijskog stola i završava u centralnoj točki ploče detektora. Teoretski, pomak bilo kojeg spomenutog predmeta na ravnini uzrokuje pojavu artefakata. No, ti artefakti nisu jednaki u svakoj situaciji. Istraživanja su pokazala da najozbiljniju distorziju uzrokuje pomak detektora u odnosu na centralnu zraku [8].

To je slučaj kada se površina detektora ukosi u odnosu na njenu centralnu os. Posljedica je smanjenje površine detektora, te pogrešna rekonstrukcija prikaza. Pomak detektora se može dogoditi još i oko centralnog reda, te stupca, no posljedice su manje. Najčešće se smanji rezolucija prikaza, no nema pojave artefakata.



Slika 12. Pomak detektora u odnosu na centralnu os [3]

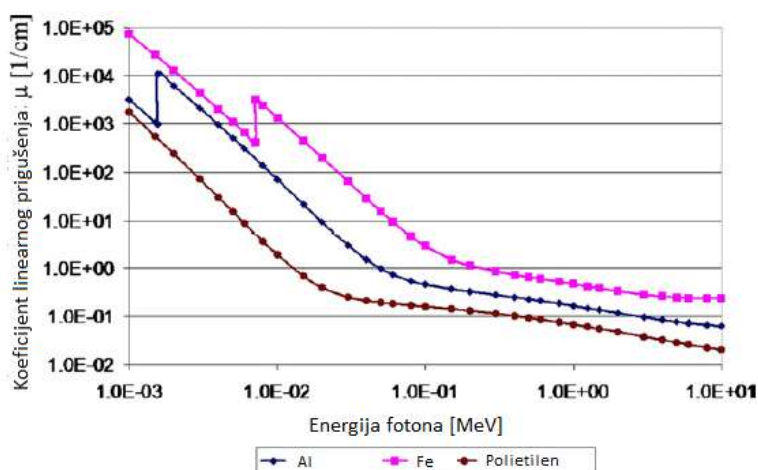
4.3 Predmet mjerenja

4.3.1 Prigušenje

Prilikom ozračivanja predmeta događa se proces prigušenja. Proces prigušenja uvelike ovisi o vrsti materijala predmeta tj. ovisi o koeficijentu prigušenja, te vrsti materijala. Prigušenje se događa zbog dvaju efekata; fotoelektrične apsorpcije te Compton raspršenja.

Pojednostavljeno rečeno, rendgenska zraka će na svojoj putanji od početka tj. izvora emitiranja energije fotona do kraja tj. detektora za prikupljanje, izgubiti određeni broj fotona, ovisno o koeficijentu prigušenja materijala objekta kroz koji prolazi. Tada će vjerojatnost izgubljenog fotona od izvorne količine emitiranih fotona biti funkcija energije [1].

Primjer koeficijentata prigušenja za različite energije fotona.



Slika 13. Koeficijent prigušenja za različite razine energije fotona

Očito je da će koeficijent prigušenja limitirati maksimalnu moguću debljinu materijala predmeta. Samim time će i masa i duljina mogućeg predmeta mjerenja biti ograničene. Postizanje optimalne kombinacije maksimalne snage prodiranja pri rotaciji se može svesti na vještinu mjeritelja. No prilikom optimizacije rotacije predmeta potrebno je obratiti pozornost na pojavu raspršenja zrake, te nestabilnosti u rekonstrukciji 3D prikaza poput djelomičnih artefakata. One se najčešće događaju zbog postavljanja površina predmeta u paralelni odnos s obzirom na emitirani snop rendgenske zrake.

Problemi se također javljaju kod mjerenja predmeta sastavljenih od više materijala. Posebnu prepreku predstavlja nemogućnost raspoznavanja granica dvaju ili više materijala. Javit će se komplikacije prilikom određivanja graničnih vrijednosti materijala. To jest, granice materijala će biti krivo određene jer uređaj ne može točno raspoznati prestanak jednog materijala te početak drugog materijala. Granica gdje postoji mogućnost za grešku uređaja, prilikom određivanja o kojem materijalu se radi, se naziva *threshold*.

Druga očita prepreka je određivanje potrebne snage za ozračivanje materijala predmeta mjerenja. Kao što je već rečeno apsorpcija materijala ovisi o njegovoj vrsti, te se stoga ne može koristiti konstantno ista vrijednost snage za cijeli predmet prilikom ozračivanja. Trenutačno, metode rješavanja ovog problema su u početnoj fazi. Moguće je nekoliko načina rješavanja poput više-energijskog mjerenja sa različitim akvizicijskim parametrima, spajanjem setova podataka, te kombiniranjem dvaju modela primjenom matematičkih operacija [7].

Rendgenske zrake imaju veću vjerojatnost prodiranja i prenošenja, ukoliko je materijal niskog atomskog broja. Shodno tome, zrake će jednostavnije prodirati kroz lake materijale, niske gustoće i obratno. Materijali visoke gustoće apsorbiraju više energije.

4.3.2 Očvršćivanje snopa zrake

Posljedica efekta očvršćivanja snopa zrake su rubni artefakti, te artefakti okoliša. Efekt očvršćivanja snopa zraka se događa zbog toga što u snopu zrake koja prolazi kroz materijal ostaju samo zrake tzv. „visoke energije“. Inače, snop zraka se sastoji od spektra energije, a to uz spomenute „visoke energije“ uključuje i snop „niske energije“. Zbog postojanja samo snopa „visoke energije“, vrijednost prigušenja više nije linearna funkcija debljine materijala. Time se otežava kvantitativna interpretacija podataka mjerenja. Posljedično, komplicira se i određivanje granice segmentacije prikaza, te mjerenje gustoće materijala i rezolucija. Potrebna je kompenzacija takvog efekta. Neke od metoda su predočvršćivanje snopa zraka korištenjem filtera, korištenje manjih uzoraka, te korekcija tijekom procesa rekonstrukcije prikaza.

4.3.3 Raspršena radijacija

Raspršena radijacija djeluje na nekoliko načina. Uzrokuje prigušenost primarnog snopa. Tijekom ozračenja dio energije fotona prelazi na elektrone materijala, te time uzrokuje *dose effect* predmeta i signala detektora. Nije isključena ni mogućnost interakcije raspršenih fotona sa neodređenim detektorom. Posljedica je greška prilikom mjerenja.

4.3.4 Sastav materijala

Sastav materijala također ima znatan utjecaj na rezultate mjerenja. Potrebno je uzeti u obzir tip materijala prije ozračivanja. O vrsti materijala ovisi koeficijent prigušenja tog materijala, te shodno tome svojstvo prodornosti emitiranih rendgenskih zraka. Problem je istaknutiji kod predmeta sastavljenih od više materijala. Svaki materijal ima vlastiti koeficijent prigušenja, te time uzrokuje izražene prugaste artefakte prilikom rekonstrukcije prikaza.

4.3.5 Hrapavost površine

Potrebno je uzeti u obzir da površina predmeta nije savršena. Hrapavost površine uzrokuje probleme ponajprije kod određivanja granice segmentacije. Također, potencijalne posljedice su lokalno osjenjivanje, te mogućnost većeg nego planiranog intenziteta.

4.4 Detektor za sakupljanje snopa zrake

Svrha detektora je pretvorba toka rendgenskih zraka u električni signal, te stoga veličina *kvantna efikasnost* ima značajnu ulogu. Ona definira omjer tog transferiranja. Na njezinu razinu utječe odabir debljine i materijala detektora. Prilikom odabira, potrebno je obratiti pozornost na koeficijent apsorpcije materijala. Izbor neadekvatnog materijala će uzrokovati nedostatan transfer rendgenskih zraka, a time i loš prikaz. Najveći utjecaj na poboljšanje tog transfera ima veličina detektora, te pripadni broj piksela. Poboljšanje linijskog detektora je dokaz potrebnog napretka. Također, kao što izvor ograničava intenzitet moguće generiranih zraka, tako i materijal detektora određuje koliki intenzitet zraka može prihvatiti. Razlika maksimalnog i minimalnog intenziteta je opisana veličinom dinamičkog raspona.

4.5 Obrada računalom

Problemi prilikom obrade računalom se očituju kod rekonstrukcije 3D prikaza, određivanja granice segmentacije, određivanja površine, te redukcije i korekcije podataka. Prilikom rekonstrukcije 3D prikaza, pojavljuje se greška sustavne razlike između vrijednosti izraženih vokselima, te koeficijenta prigušenja predmeta. Pretpostavlja se da je to posljedica pomaka tijekom ozračivanja. Mogućnost sakupljanja velike količine podataka, te veličine prikaza je doživjela svoju najjaču ekspanziju početkom novog milenija. Takav iznenadni rast je ponekad prevelika zapreka za moderna računala. Rezultira tzv. zagušenjem procesa gdje dolazi do posljedično dužeg vremena trajanja procesa. Time dolazimo do redukcije podataka koja donosi optimizaciju podataka. Jednostavno rečeno, smanjuje se broj podataka u obliku poligonalne mreže, kako bi se omogućio učinkovit rad vizualizacijskog softvera. No, redukcija za sobom nosi i neugodne pojave poput degradacije kvalitete CT ozračivanja. Također, s protekom vremena primijećeno je da se skalarni faktori dobiveni korištenjem referentnih objekata mijenjaju. Promijenjeni skalarni faktori mogu utjecati na veličinu vokseli, te time na rekonstrukciju prikaza. Problem se rješava istovremenim ozračivanjem referentnog predmeta i predmeta mjerenja.

Pogreške u određivanju granice segmentacije uzrokuju pogrešno dodjeljivanje površine od strane CT uređaja. Konkretno, granica segmentacije označava granicu između predmeta i zraka. Postoji nekoliko načina određivanja granice segmentacije, poput istovremenog mjerenja unutarnje i vanjske geometrije predmeta mjerenja, te kasnije usporedbe sa mjerama kalibriranog predmeta. Metode poput napredne i automatske su pak preciznije i sporije, jedna u odnosu na drugu i obratno.

4.6 Mjeritelj

Mjeritelj je između ostalog zadužen za odabir parametara planiranog mjerenja kao i odabir strategije mjerenja. Prilikom odabira parametara mjerenja mjeritelju pomažu specijalizirani softverski sustavi ili već predefimirani parametri za određenu vrstu mjerenja. Znači da će opseg izbora parametara mjerenja ovisiti znatno i o vještini mjeritelja. Mjeritelj sa ograničenim znanjem i setom vještina će izvršiti mjerenje sa ograničenim odabirom parametara.

Mjeritelj također ima znatan utjecaj na propisane procedure tijekom procesa mjerenja. Postojanje pravilne procedure je evidentno kod primjerice postavljanja predmeta na postolje za mjerenje i rotacijski stol. Potrebno je učvrstiti predmet, kako prilikom rotacije ne bi došlo do pomaka predmeta, te shodno tome mutnog prikaza predmeta. Ne smiju se koristiti veliki materijalni predmeti kao sredstvo učvršćenja, iz razloga što oni sami mogu utjecati na prigušenje emitiranih rendgenskih zraka. Također, svojim dimenzijama mogu utjecati na svojstvo geometrijskog povećanja predmeta kao i na samu mogućnost rotacije predmeta. Kao sredstvo učvršćenja predmeta mjerenja koriste se predmeti izrađeni od karbonskih vlakana, vrsta tvrde pjene, ili se primjenjuje tehnika lijepljenja predmeta na postolje.

Utjecaj mjeritelja je vidljiv i na pretprocesnim i na postprocesnim radnjama. Pretprocesne radnje su postizanje tražene temperature, te kalibracija veličine piksela i voksel. U pretproces su uključeni filtriranje, segmentacija prikaza, te završna geometrijska analiza. Utjecaj mjeritelja se očituje na ponovljivosti mjernih rezultata, te shodno tome povećanju sustavnih devijacija. Mjeritelju je omogućen veliki izbor modela strategija poput rotacijskog centriranog skeniranja, digitalne laminografije, spiralnog skeniranja itd. Svaka od navedenih metoda ima svoje prednosti i nedostatke. Odabirom pogreške, mjeritelj utječe na vrijeme mjerenja, preciznost mjerenja, pojavu artefakata, te rezoluciju prikaza.

4.6.1 Geometrijsko povećanje

Utjecaj mjeritelja na geometrijsko povećanje se iskazuje fizičkim pomakom predmeta mjerenja. Razina povećanja se može povisiti postavljanjem predmeta mjerenja bliže izvoru rendgenskih zraka, ili obrnuto, tj. postavljanje bliže detektoru. Definicija geometrijskog povećanja se može iskazati sljedećim izrazom:

$$M = FDD / FOD, \quad (2)$$

gdje je

FDD - udaljenost između izvora rendgenske zrake i detektora, dok je

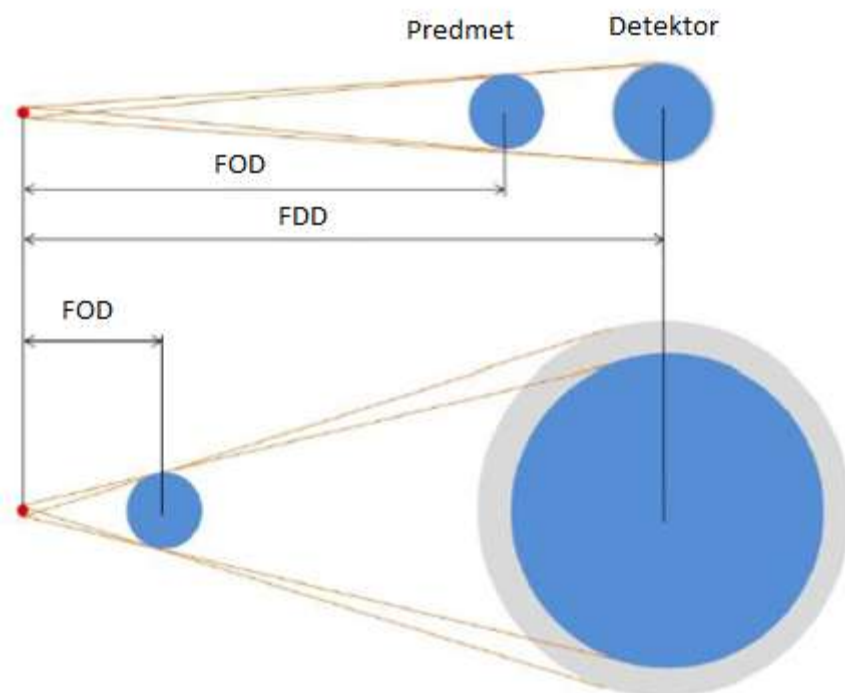
FOD - udaljenost između izvora rendgenske zrake i predmeta mjerenja.

U pravilu, učinkovito geometrijsko povećanje ovisi o iskustvu i vještini mjeritelja. Loše pozicioniranje će rezultirati između ostalog, mutnim rekonstruiranim prikazom. Iako ne zasebno, utjecaj geometrijskog povećanja je istražen u kombinaciji sa drugim parametrima. Istraživanja su pokazala da povišenje razine geometrijskog povećanja, ne rezultira nužno boljom preciznošću prikaza, zbog već spomenutog efekta mutnog prikaza [9].

4.6.2 Postavljanje predmeta mjerenja

Kada govorimo o postavljanju predmeta mjerenja, tada možemo govoriti i o slučajnom pomaku, za razliku od pomaka s ciljem geometrijskog povećanja. U slučaju znatnog nenamjernog pomaka predmeta mjerenja mogu se očekivati rezultati poput pretamnih ili preosvijetljenih prikaza, te neravnomjernih artefakata [11].

Obje greške se javljaju zbog nepravilno ozračenog predmeta, te je zato na mjeritelju odgovornost postavljanja predmeta u pravilnu poziciju u odnosu na izvor rendgenskih zraka, te detektor uređaja.



Slika 14. Utjecaj uvećanja na pojavu zamagljenja na skenu [3]

4.6.3 Broj projekcija

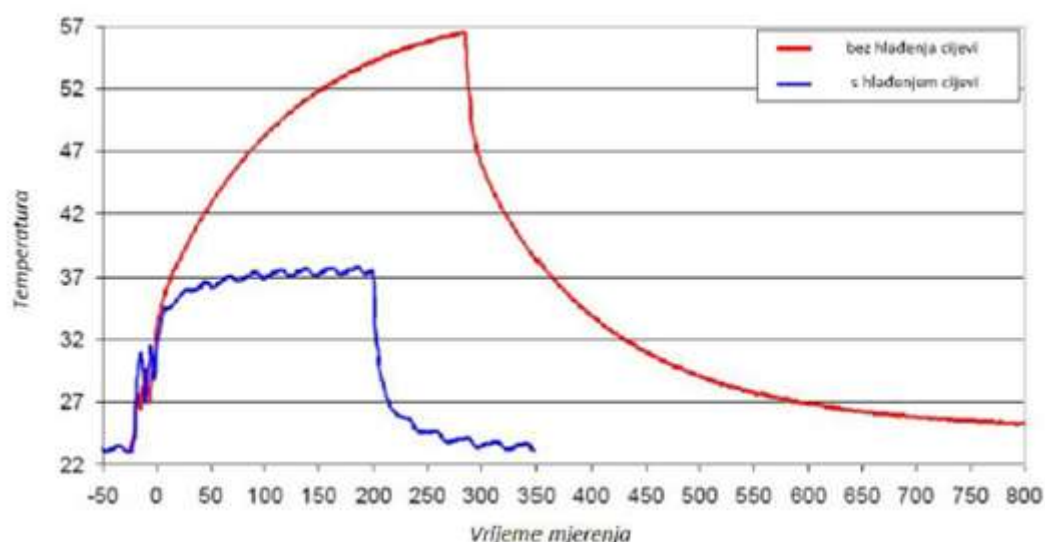
Broj projekcija nije samo povezan sa poboljšanjem kvalitete prikaza. Nužnost što manjeg broja projekcija se očituje i u njenoj ekonomskoj važnosti. Ponajprije, smanjenju ukupnih troškova, smanjenjem vremena rada uređaja.

4.7 Okoliš

Posljedica okolišnih utjecajnih parametara je dodatno povećanje smetnji u dobivenim podacima. Već spomenuto hlađenje cijevi izvora rendgenskih zraka pomaže pri kontroli utjecaja temperature.

Dimenzionalno mjeriteljstvo je jedina tehnologija koja zahtijeva izvođenje mjerenja striktno na temperaturi od 20 °C. Kontrolu konstantne temperature otežava prisutnost izvora topline unutar CT uređaja. Pritom se ne misli samo na izvor rendgenskih zraka, već i na pogone, detektore i svu prisutnu elektroniku sustava.

Mjerna sljedivost će biti osigurana jedino u slučaju kada su temperature svih pojedinih elemenata sustava unutar $20 \pm 0,1 - 0,5$ °C intervala. Ukoliko dođe do prelaska zadane temperature elemenata sustava potrebno je proračunati kompenzacijsku grešku mjerenja. Proračun kompenzacijske greške mora sadržavati ne samo standardnu devijaciju temperature pri 20 °C, već i utjecaj toplinskog gradijenta prema ISO standardu. Naravno, krivo postavljenim izračunom greške povećava se mogućnost dobivanja pogrešnog rezultata.



Slika 15. Utjecaj temperature na stabilnost materijala mete [3]

Slično temperaturi, kontroliranje i nadzor relativne vlažnosti u prostoriji, gdje se nalazi CT uređaj je veoma važno. Relativna vlažnost nam pokazuje kolika je razina vlage trenutačno u zraku. Vrijednost je iskazana kao postotak maksimalne moguće količine vlage koju zrak može podnijeti. Utjecaj parametra vlage je analiziran detaljnije u području medicine nego u dimenzionalnom mjeriteljstvu. Preporuka proizvođača medicinskih uređaja je između 30 % i 70 % relativne vlažnosti zraka u prostoriji.

Ukoliko je vrijednost relativne vlažnosti iznad 70 %, postoji rizik oštećenja elektroničkih komponenti CT uređaja [13].

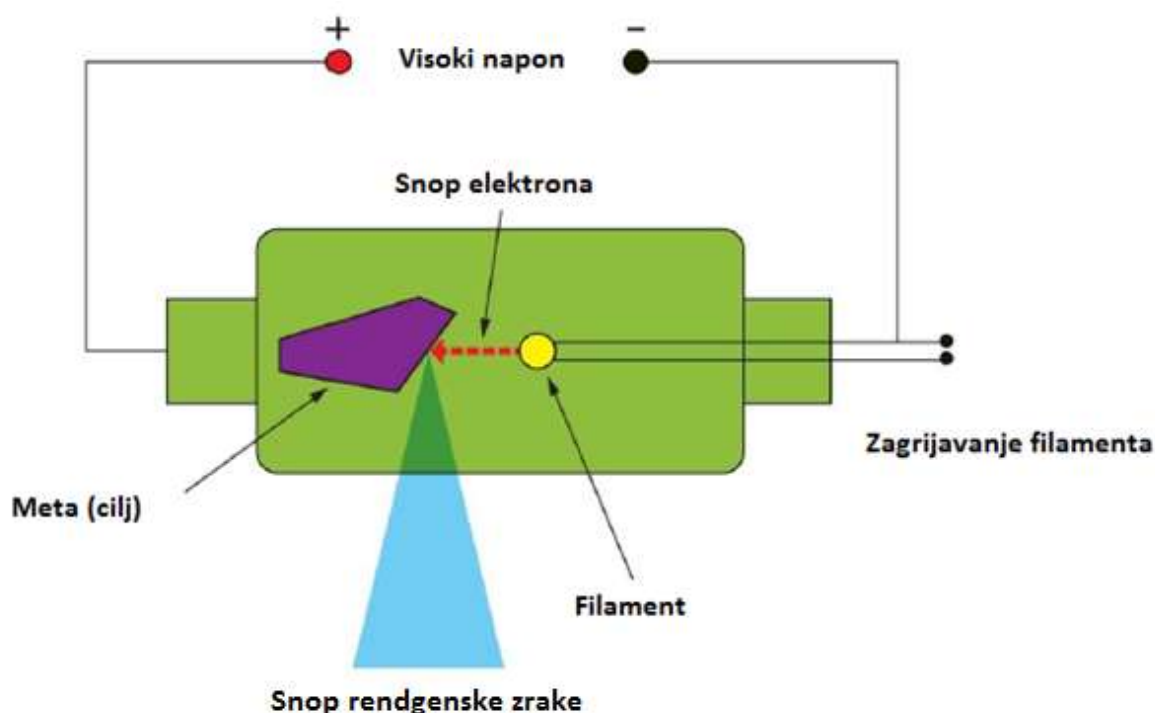
Iako je ta vrijednost još nedokazana za područje dimenzionalnog mjeriteljstva, ona predstavlja dobar indikator za buduća mjerenja.

CT uređaji su osjetljivi na razine vibracije koje su neprimjetne ljudskim osjetilima. To se posebice odnosi na vibracije cijele prostorije unutar koje se nalazi CT uređaj, pa i cijele zgrade u kojoj se nalazi, s obzirom da svaki objekt ima vlastitu određenu vibraciju. Takve vibracije uzrokuju pomake između komponenata uređaja. Posljedice utjecaja vibracija su efekt *ghostinga*, te pojava artefakata. Vibracije se uočavaju posebnom mjernom opremom, te ugradnjom nadzornih uređaja, poput kamera [14].

5. SUSTAVNE GREŠKE XCT SUSTAVA

5.1 Pomak pri strujanju snopa zrake

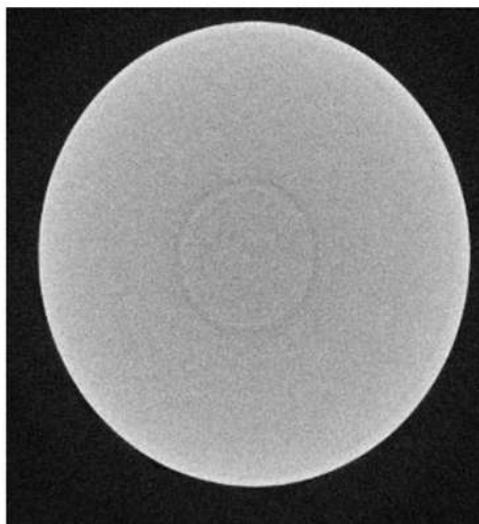
Do pomaka pri strujanju snopa zrake dolazi zbog promjene dimenzije rendgenske cijevi. Konkretno, unutar rendgenske cijevi nastaje velika količina topline prilikom emitiranja fotona energije. Takva velika promjena temperature unutar kratkog vremena može uzrokovati termalno proširenje dimenzija rendgenske cijevi. Prekomjerno toplinsko opterećenje značajno utječe na prostornu stabilnost žarišta snopa zrake tj. prisutnost strujanja snopa zraka (eng. *beam drift*). Trenutačno rješenje u industriji je integracija sustava za hlađenje unutar rendgenske cijevi, istodobno zadržavajući jedinicu sustava za hlađenje unutar komore za mjerenje, s ciljem poboljšanja termalnih kontrolnih karakteristika sustava za hlađenje.



Slika 16. Prikaz refleksije kod rendgenske cijevi [12]

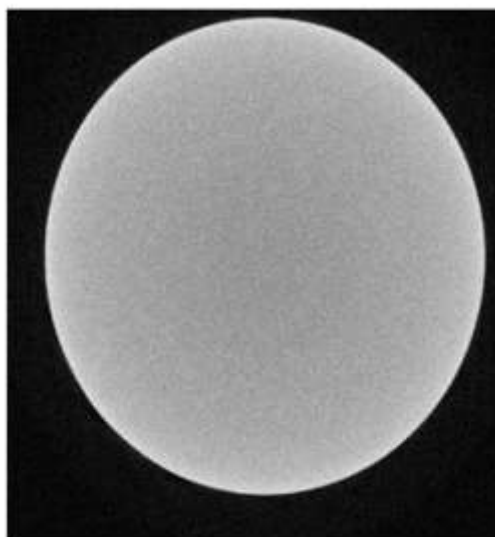
5.2 Prstenasti artefakti

Uzroci nastanka prstenastih artefakata su brojni; rezultat defekata ili loše kalibracije detektora, nelinearnog ponašanja materijala detektora, varijacije izlaza detektora od kanala do kanala, loša uniformnost, mehaničko odstupanje izvora rendgenskih zraka i detektora, itd.



Slika 17. Prikaz prstenastog artefakta [12]

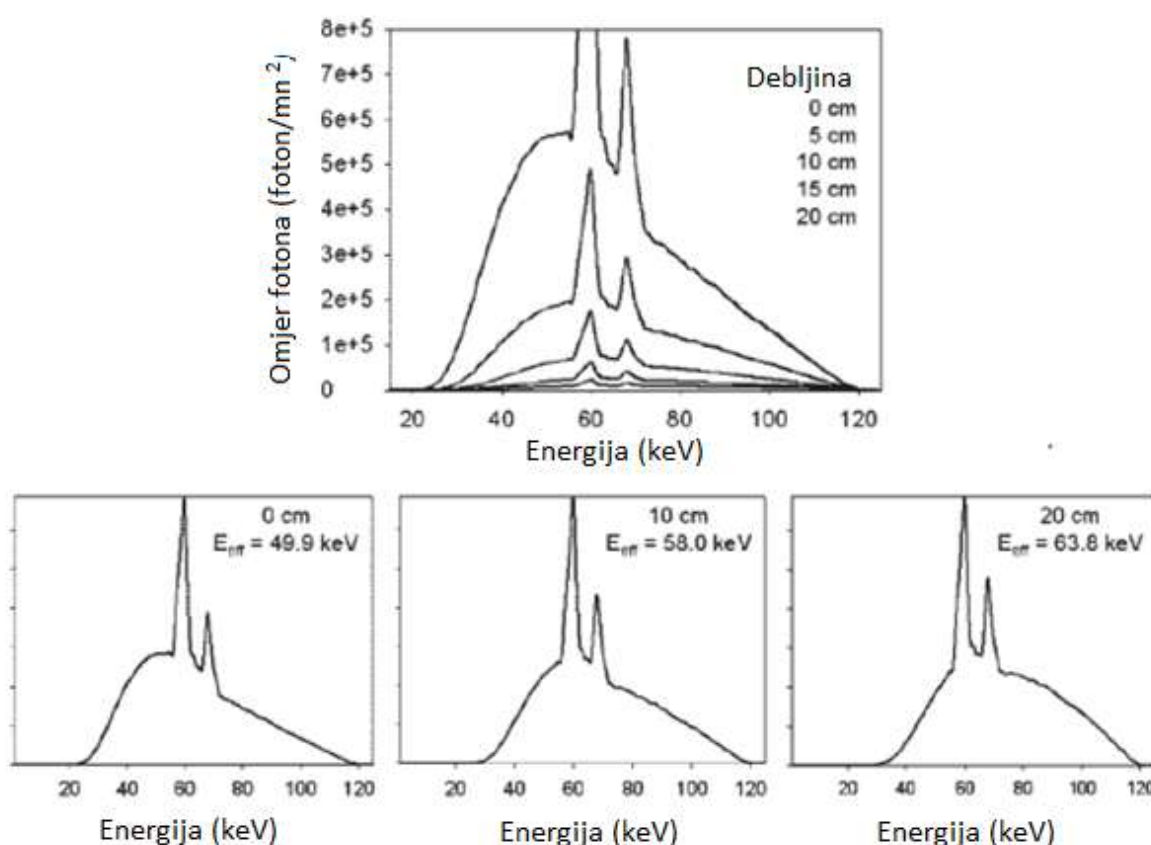
Među istaknutijim metodama ispravljanja pojave takvih artefakata su kalibracija detektora, te mogućnost numeričkog ispravljanja. Potonja se odnosi na transformaciju pravokutnog u koordinatni sustav.



Slika 18. Prikaz uklonjenog prstenastog artefakta [12]

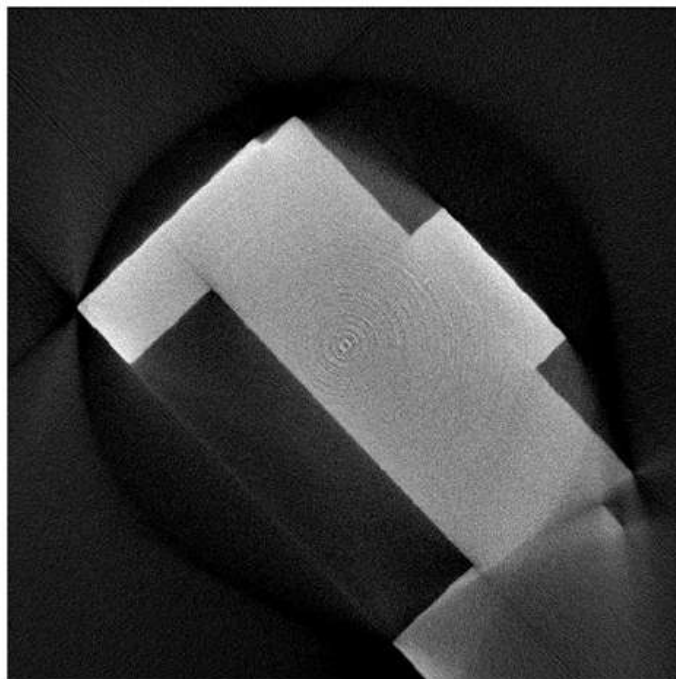
5.3 Efekt očvršćivanja snopa zraka

Efekt očvršćivanja snopa zrake je rezultat greške u procjeni koeficijenta prigušenja materijala. Proces rekonstrukcije CT uređaja radi na pretpostavci da je apsorpcija rendgenskih zraka specifično svojstvo svakog materijala, te time neovisno o razini energije fotona rendgenske zrake. No, već je spomenuta situacija ozračivanja predmeta mjerenja, gdje se rendgenske zrake „niske energije“ preferencijalno apsorbiraju ispred rendgenskih zraka „visoke energije“. Time dolazi do neslaganja između pretpostavke (jednake apsorpcije svih razina energije) i stvarnog slučaja (preferencijalne apsorpcije).



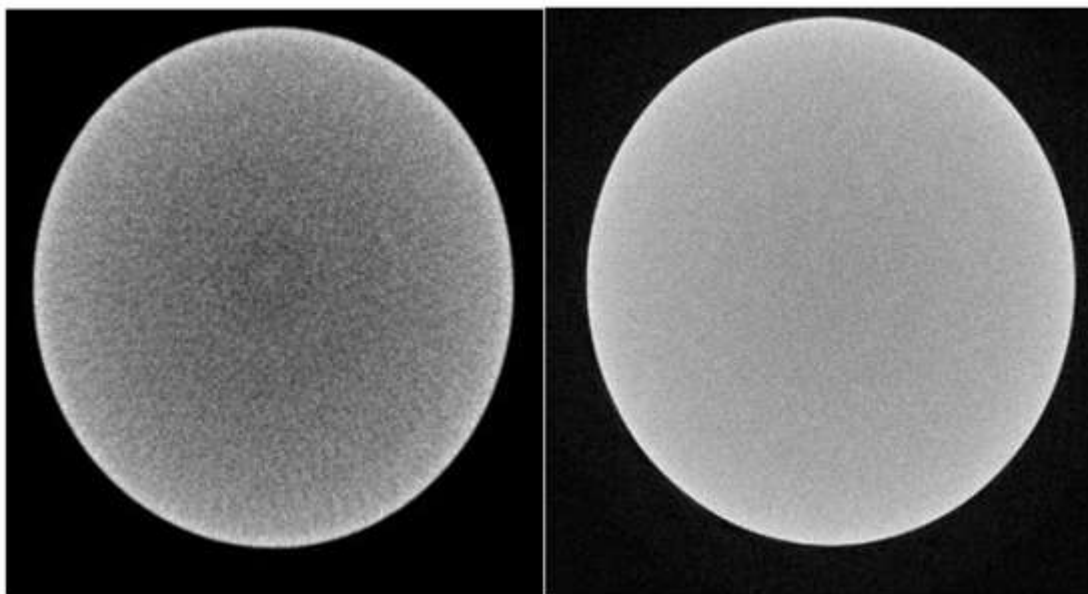
Slika 19. Prikaz prodiranja rendgenskih zraka na uzorku različite debljine [12]

Rezultat je najčešće vanjski rub predmeta svjetliji od unutrašnjeg ruba na rekonstruiranom prikazu. Dva uobičajena artefakta nastala efektom očvršćivanja snopa zrake su prstenasti i metalni artefakti.



Slika 20. Prikaz prstenastog i metalnog (streak) artefakta [12]

Postoji nekoliko načina za ispravljanje efekta očvršćivanja snopa zrake. Može se koristiti filter za filtriranje u cilju uklanjanja rendgenskih zraka „niske energije“. Filter je najčešće tanka pločica bakra ili aluminija, te se postavlja između izvora i uzorka. Metoda numeričkog ispravljanja pak zahtijeva korištenje polinoma drugog i trećeg reda, te iterativnih metoda. Za razliku od brze metode poput filtriranja, postoji i dugotrajnija i skupa metoda dualne energije. Ona koristi dva snopa rendgenskih zraka za kalkulaciju ukupne energije.

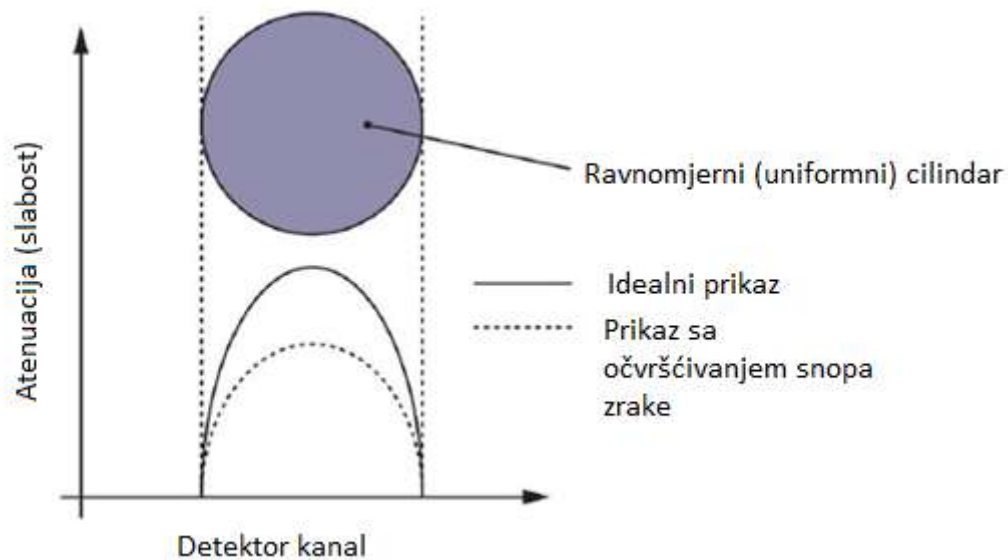


Slika 21. Učinak očvršćivanja snopa zrake na prikazu bez filtriranja (lijevo) te na prikazu sa bakrenim filterom debljine 1mm (desno) [12]

Dva uobičajena prstenasta artefakta, nastala očvršćivanjem snopa zrake, su prugasti artefakti te *cupping* artefakti.

Faktori poput pomaka predmeta prilikom mjerenja, nedovoljnog broja zadanih rotacijskih točaka, te odstupanje koordinatnog sustava mogu uzrokovati pojavu prugastih artefakata. Također, uzrok može biti i metalni dio uređaja koji oslabljuje ukupnu snagu energije rendgenskih zraka.

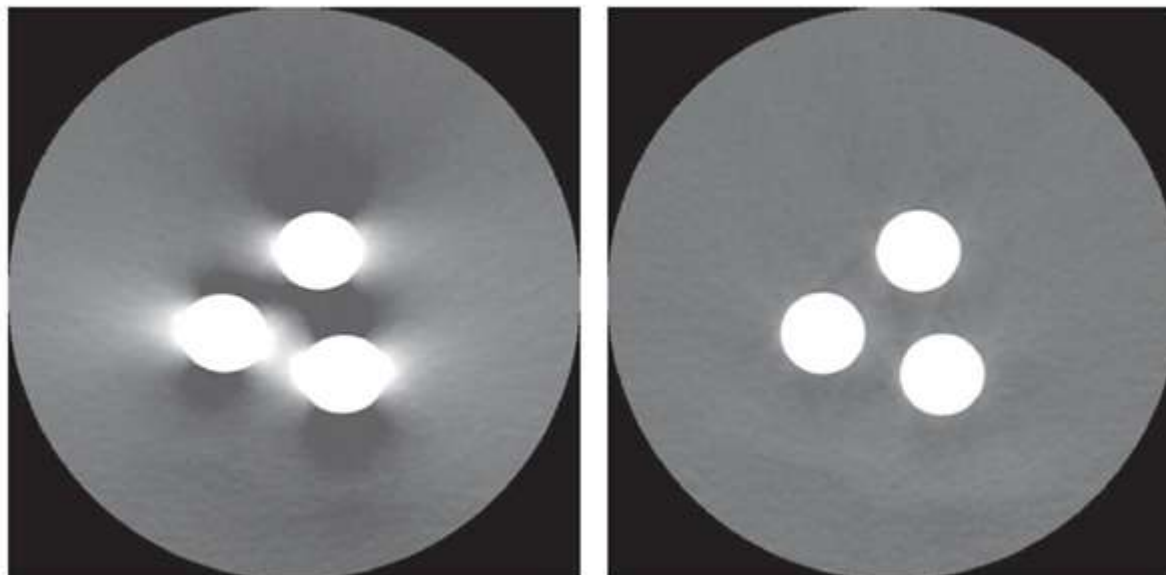
Cupping artefakti se pojavljuju zbog neravnomjernog očvršćivanja. Primjerice, kada zrake prolaze kroz cilindar, one zrake u sredini cilindra su na kraju procesa više stvrdnute nego one na rubovima. Posljedično, gustoće su u unutrašnjosti manje nego na vanjskim rubovima.



Slika 22. *Cupping* zbog očvršćivanja snopa zrake

5.4 Artefakti djelomičnog volumena

Ukoliko dođe do ograničenog ozračivanja CT uređaja pojaviti će se artefakti djelomičnog volumena. Razlog može biti bilo kakva fizička prepreka koja sprječava protok rendgenskih zraka do detektora za njihovo sakupljanje. Postoje ograničene metode ublažavanja takve pojave, gdje se dodatna rekonstrukcija prikaza obavlja numeričkom procjenom.



Slika 23. Primjer parcijalnih artefakata

Slika triju šipki promjera 12 mm paralelnih i otprilike 15 cm od osi uređaja. Lijevo je prikaz parcijalnih artefakata šipki parcijalno intrudiranih u širinu sekcije, dok je desno prikaz parcijalnih artefakata potpuno intrudiranih u širinu sekcije [12].

6. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

U eksperimentalnom dijelu rada provesti će se dva zasebna eksperimenta. U prvom dijelu izvršiti će se usporedba različitih metoda primjene planova pokusa, dok će se u drugom dijelu provesti djelomičan plan pokusa sa ciljem procjene sastavnice standardne nesigurnosti. No, prvo će se opisati djelomični plan pokusa.

6.1 Djelomični plan pokusa

U sljedećim poglavljima opisan je djelomični plan pokusa koji će se koristiti prilikom usporedbe planova pokusa, te procjene sastavnice nesigurnosti.

6.1.1 Frakcionalna replikacija 2^k plana pokusa

Broj pokusa potpunih planova eksponencijalno raste s povećavanjem broja utjecaja. Na primjer, za pet čimbenika potrebno je 32 pokusa (2^5), dok je za šest čimbenika potrebno 64 pokusa (2^6). U ovom planu samo 5 stupnjeva slobode odgovara glavnim utjecajima, dok 10 stupnjeva slobode odgovara dvo-faktorskim interakcijama. 16 od mogućih 31 stupnjeva slobode se koristi za procjenu za procjene interakcija višeg reda, tj. tro-faktorske i više. Ako pretpostavimo da su određeni utjecaji višeg reda zanemarivi, za dobivanje informacija o glavnim utjecajima i interakcijama nižeg reda može se koristiti djelomični plan pokusa sa manje potrebnih ponavljanja od onih propisanih potpunim 2^k planom pokusa. Djelomični plan pokusa je među najčešće korištenim tipovima metoda za planiranje pokusa. Najčešće se koristi kod verifikacijskih analiza. Verifikacijske analize se izvode u ranoj fazi pokusa, kada se uzima velik broj čimbenika u obzir, te se postupno odvajaju oni čimbenici bez stvarnog utjecaja na konačni rezultat pokusa. Čimbenici, odvojeni zbog velikog utjecaja na rezultat pokusa, se dalje istražuju naknadnim istraživanjima. Stoga, ukoliko je broj čimbenika relativno velik, željene preliminarne informacije se mogu dobiti upotrebom samo pojedinog dijela potpunog plana, ako se međudjelovanja višeg reda (između više od dva čimbenika) mogu zanemariti [15].

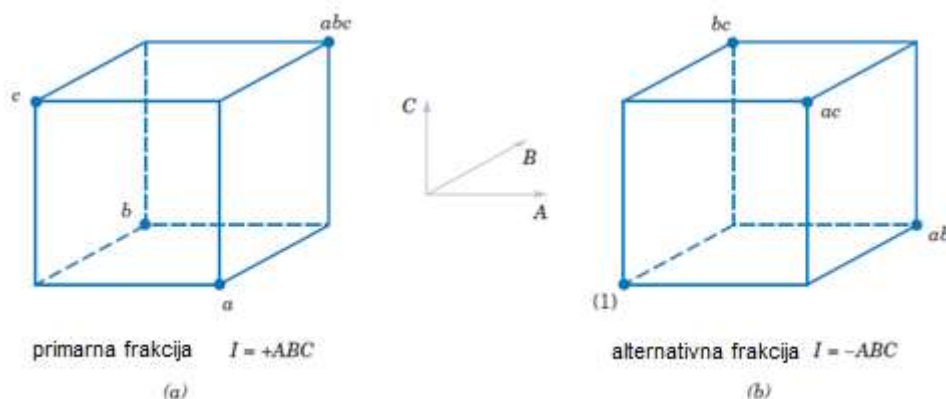
6.1.2 Polovina (eng. *One half fraction*) 2^k plana pokusa

U načelu, izabire se $1/2$, $1/4$, $1/8$ itd. potpunog plana, pri čemu izabrani pokusi trebaju biti uravnoteženi i ortogonalni. Znak k predstavlja ukupni broj čimbenika, dok znak l predstavlja cijeli broj koji ukazuje na nepotpunost plana. Za $l = 0$, faktorski plan je potpun.

$1/2$ djelomični plan 2^k pokusa sadrži 2^{k-1} ponavljanja. Primjerice, 2^{3-1} plan pokusa, tj. $1/2$ plana pokusa 2^3 sadrži četiri ponavljanja, za razliku od potpunog plana pokusa koji bi sadržavao osam ponavljanja. Primjenjive kombinacije za djelomični plan pokusa se uzimaju iz tablice plus i minus znakova za potpuni 2^3 plan pokusa. Odabiru se četiri primjenjive kombinacije a , b , c i abc kao $1/2$ -čna frakcija. Odabrane kombinacije su prikazane u tablici.

Tablica 1. Tablica plus i minus znakova za 2^3 plan pokusa

| Primijenjiva kombinacija | Utjecaji | | | | | | | |
|--------------------------|----------|-----|-----|-----|------|------|------|-------|
| | I | A | B | C | AB | AC | BC | ABC |
| a | + | + | − | − | − | − | + | + |
| b | + | − | + | − | − | + | − | + |
| c | + | − | − | + | + | − | − | + |
| abc | + | + | + | + | + | + | + | + |
| ab | + | + | + | − | + | − | − | − |
| ac | + | + | − | + | − | + | − | − |
| bc | + | − | + | + | − | − | + | − |
| (1) | + | − | − | − | + | + | + | − |



Slika 24. Polovina frakcije 2^3 plana pokusa

Prilikom stvaranja 2^{3-1} plana pokusa važno je primijetiti da se uzimaju iz tablice samo one kombinacije koje daju plus znak u ABC čimbeniku. Stoga, ABC čimbenik se naziva generatorom takve frakcije. Nadalje, identifikacijski element I je označen plus znakom za odabrane kombinacije tako da je $I=ABC$ definirajuća relacija plana pokusa. Primijenjive kombinacije u 2^{3-1} planu pokusa daju tri stupnja slobode povezana s glavnim čimbenicima. Iz gornje polovine tablice se uzimaju procjene glavnih čimbenika kao promatrane linearne kombinacije,

$$\begin{aligned}
A &= \frac{1}{2}[a - b - c + abc] \\
B &= \frac{1}{2}[-a + b - c + abc] \\
C &= \frac{1}{2}[-a - b + c + abc]
\end{aligned} \quad (3)$$

Također je jednostavno potvrditi da su procjene dvo-faktorskih interakcija sljedeće linearne kombinacije:

$$\begin{aligned}
BC &= \frac{1}{2}[a - b - c + abc] \\
AC &= \frac{1}{2}[-a + b - c + abc] \\
AB &= \frac{1}{2}[-a - b + c + abc]
\end{aligned} \quad (4)$$

Znači da linearna kombinacija u stupcu A procjenjuje glavni čimbenik A kako i BC interakciju. To jest, ona procjenjuje sumu tih dvaju utjecaja $A+BC$. Isto tako vrijedi i za ostale stupce, u stupcu B procjenjuje se suma $B+AC$, u stupcu C procjenjuje se $C+AB$. Dva ili više čimbenika koji imaju takva svojstva se nazivaju pseudonimi (alias). Pseudonimi su izravan rezultat djelomičnog planiranja pokusa. U praktičnim primjenama moguće je stvoriti pseudonim strukturu, tako da su glavni čimbenici i interakcije nižeg reda povezane samo sa interakcijama višeg reda, koje su zanemarive. Pseudonim struktura se dobiva množenjem definirajuće relacije $I=ABC$. U ovom primjeru to znači:

$$A = A * ABC = A^2 B C = BC \text{ s obzirom da je } A * I = A \text{ i } A^2 = I.$$

Pseudonimi B i C su

$$B = B * ABC = AB^2 C = AC \text{ te}$$

$$C = C * ABC = ABC^2 = AB$$

Naravno, može se krenuti i u suprotnom smjeru. Primjerice, ako se uzme u obzir druga polovina primijenjivih kombinacija tablice, one povezane sa minus znakovima ABC interakcije. Definirajuća relacija ovakvog plana je $I=-ABC$, dok su pseudonimi $A=-BC$, $B=-AC$, $C=-AB$. Svejedno je koja se polovina u praksi odabere. No, polovina sa plus znakovima se naziva primarna frakcija, dok se ona sa minus znakovima naziva alternativna frakcija.

Ako se uzme AB kao generator djelomičnog plana tada je,

$$A = A * B = B,$$

dva glavna čimbenika faktora A i B će biti pseudonimi. Takva situacija donosi gubitak važnih informacija. Ponekad se koriste sekvence djelomičnog plana pokusa kako bi se provele procjene čimbenika. Primjerice, ako uzmemo 2^{3-1} primarnu frakciju plana pokusa sa ABC kao njenim generatorom. Tada su procjene čimbenika sljedeće:

$$\begin{aligned}
 \ell_A &= A + BC \\
 \ell_B &= B + AC \\
 \ell_C &= C + AB
 \end{aligned} \quad (5)$$

U ovoj situaciji dobrovoljno pretpostavljamo da su dvo-faktorske interakcije zanemarive. Ako je tako, ovakav plan pokusa je pružio procjene utjecaja triju glavnih čimbenika A , B , C . No, ukoliko nismo sigurni, takvu procjenu utjecaja nam može pružiti alternativna frakcija plana pokusa. Tada su procjene utjecaja sljedeće:

$$\begin{aligned}
 \ell'_A &= A - BC \\
 \ell'_B &= B - AC \\
 \ell'_C &= C - AB
 \end{aligned} \quad (6)$$

Nadalje, potrebno je dobiti inverzne pseudonim procjene glavnih čimbenika i dvo-faktorskih interakcija, dodavanjem i oduzimanjem dobivenih linearnih kombinacija dvaju odvojenih frakcija (primarna i alternativna). Primjerice, ako tražimo inverzni pseudonim faktora A iz dvo-faktorske interakcije BC , možemo prikazati utjecaje kao sljedeću kombinacije:

$$\frac{1}{2}(\ell_A + \ell'_A) = \frac{1}{2}(A + BC + A - BC) = A \quad (7)$$

i,

$$\frac{1}{2}(\ell_A - \ell'_A) = \frac{1}{2}(A + BC - A + BC) = BC \quad (8)$$

Rezultati tri para procjena utjecaja su sljedeći:

| Utjecaj , i | od $\frac{1}{2}(\ell_i + \ell'_i)$ | od $\frac{1}{2}(\ell_i - \ell'_i)$ |
|---------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| $i = A$ | $\frac{1}{2}(A + BC + A - BC) = A$ | $\frac{1}{2}[A + BC - (A - BC)] = BC$ |
| $i = B$ | $\frac{1}{2}(B + AC + B - AC) = B$ | $\frac{1}{2}[B + AC - (B - AC)] = AC$ |
| $i = C$ | $\frac{1}{2}(C + AB + C - AB) = C$ | $\frac{1}{2}[C + AB - (C - AB)] = AB$ |

Kombiniranjem dviju sekvenci dvaju djelomičnih planova pokusa, mogu se izolirati glavni čimbenici te dvo-faktorske interakcije. Ovakva svojstva su iznimno važna pri analizi eksperimentalnih problema jer omogućuju ponavljanja sekvenci malih, učinkovitih eksperimenata, kombiniranje informacija zasebnih eksperimenata, kao i prednost učenja o procesu s kojim eksperimentiramo. Takva svojstva opisuju proces sekvencijalnog eksperimentiranja.

2^{k-1} plan pokusa se može stvoriti dodavanjem k faktora osnovnom planu, tj. primijenjivim kombinacijama za potpuni plan pokusa sa $k-1$ brojem faktora. Dodavanje k faktora se vrši identifikacijom plus i minus razina k faktora sa plus i minus znakovima najvišeg reda interakcije. Tada je 2^{3-1} plan pokusa stvoren prvo korištenjem osnovnog 2^2 plana, te naknadnim izjednačavanjem faktora C sa interakcijom $+/- AB$. Tada se za stvaranje primarne frakcije koristi $C+AB$ na sljedeći način:

Tablica 2. Stvaranje primarne frakcije

| Potpuni plan | | Djelomični plan | | |
|--------------|-----|---------------------|-----|----------|
| 2^2 | | $2^{3-1}, I = +ABC$ | | |
| A | B | A | B | $C = AB$ |
| – | – | – | – | + |
| + | – | + | – | – |
| – | + | – | + | – |
| + | + | + | + | + |

Za dobivanje alternativne frakcije potrebno je izjednačiti zadnji stupac sa izrazom $C = -AB$.

6.1.3 Manje frakcije: 2^{k-p} djelomični plan pokusa

Iako je 2^{k-1} plan pokusa izuzetno važan u smanjenju broja potrebnih ponavljanja za eksperiment, često su manje frakcije jednako ili više učinkovite u pružanju korisnih informacija. Općenito, 2^k plan pokusa se može koristiti kao $1/2^p$ frakcija, naziva 2^{k-p} djelomični plan pokusa. Tako da se $1/4$ frakcije naziva 2^{k-2} plan, $1/8$ frakcije se naziva 2^{k-3} plan, dok se $1/16$ frakcije naziva 2^{k-4} plan pokusa itd.

Kako bi se поближе opisala $1/4$ frakcije, razmotrite eksperiment sa šest čimbenika, te pretpostavite interes ispitivača za glavne utjecaje kao i dvo-faktorsku interakciju. 2^{6-1} plan zahtijeva 32 ponavljanja te ima 31 stupanj slobode za procjenu utjecaja. S obzirom da postoji 6 glavnih utjecaja i 15 dvo-faktorskih interakcija, frakcija $1/2$ je neučinkovita jer iziskuje previše ponavljanja. Primjerice, frakcija $1/4$ ima bolje izgleda, tj. 2^{6-2} plan. Plan sadrži 16 ponavljanja te njegovih 15 stupnjeva slobode dopušta ispitivaču procjenu 6 glavnih utjecaja, kao i donekle procjenu dvo-faktorskih interakcija. Dizajn takvog plana je sljedeći; prvo se postavi 2^4 plan pokusa sa faktorima A, B, C i D kao osnovni plan te im se dodaju dva stupca za E i F . Potom je potrebno je izabrati dva generatora plana $I = ABCE$ i $I = BCDF$, kako bi se generirali novi stupci. Znači, stupac E se generira iz $E = ABC$, dok se stupac F generira iz $F = BCD$. Tj. stupci $ABCE$ i $BCDF$ su identični identifikacijskim stupcu. No, poznato je da je produkt bilo koja dva stupca u tablici plus i minus znakova za 2^k plan, novi stupac. Tako da je produkt $ABCE$ i $BCDF$ također novi stupac tablice. Posljedično, ukupna definirajuća relacija za 2^{6-2} plan pokusa je

$$I = ABCE = BCDF = ADEF \quad (9)$$

Za pronalazak pseudonima bilo kojeg utjecaja, potrebno je pomnožiti taj utjecaj sa svakim slovom definirajuće relacije. Primjerice, pseudonim utjecaja A je

$$A = BCE = ABCF = DEF \quad (10)$$

Prikaz ukupnog odnosa pseudonima je prikazan u sljedećoj tablici. Općenito, rezolucija 2^{k-p} plana je jednaka broju slova u najkraćoj riječi u ukupnoj definirajućoj relaciji. Tako da ovaj primjer predstavlja rezolucijski dizajn; glavni utjecaji su pseudonimi sa tro-faktorskim i interakcijama višeg reda, dok su dvo-faktorske interakcije pseudonimi jedni sa drugima. Ovakav plan bi pružio korisne informacije o glavnim utjecajima kao i ponešto informacija o snazi dvo-faktorskih interakcija [6].

Tablica 3. Pseudonim struktura

| | |
|-------------------------|-------------------------|
| $A = BCE = DEF = ABCDF$ | $AB = CE = ACDF = BDEF$ |
| $B = ACE = CDF = ABDEF$ | $AC = BE = ABDF = CDEF$ |
| $C = ABE = BDF = ACDEF$ | $AD = EF = BCDE = ABCF$ |
| $D = BCF = AEF = ABCDE$ | $AE = BC = DF = ABCDEF$ |
| $E = ABC = ADF = BCDEF$ | $AF = DE = BCEF = ABCD$ |
| $F = BCD = ADE = ABCEF$ | $BD = CF = ACDE = ABEF$ |
| $ABD = CDE = ACF = BEF$ | $BF = CD = ACEF = ABDE$ |
| $ACD = BDE = ABF = CEF$ | |

6. 2 Usporedba različitih metoda primjene planova pokusa

U sljedećem poglavlju usporediti će se primjena potpunog i djelomičnog plana pokusa. Kao referentna vrijednost koristiti će se rezultati dobiveni potpunim planom pokusa izraženi u obliku završnog matematičkog modela sa stvarnim faktorima.

6.2.1 Opis mjerenja i rezultati potpunog plana pokusa

Potrebno je statističkom analizom utvrditi utjecaj parametara MAG zavarivanja na mehaničko svojstvo čelika *API 5L X80*, konkretno udarni rad loma metala zavara. Za određivanje plana pokusa u statističkoj analizi odabrana su 3 faktora [17].

Odabrani faktori su:

- udio CO_2 u zaštitnom plinu Ar, %
- unos topline, Q , kJ/cm
- temperatura predgrijavanja, θ , °C.

Udarni rad loma metala zavara određuje otpornost područja zavara krhkom lomu i mjera je za žilavost materijala. Udarni rad loma je energija utrošena za lom ispitnog uzorka kod ispitivanja. Označava se sa KV (ispitni uzorak s V zarezom) i izražava se u džulima (J). Vrijednosti udarnog loma zavara, primijenjene u zadatku, su očitane iz literature.²

² Vrijednosti *response* faktora udarnog loma zavara očitane iz „*Uticaj parametara zavarivanja na strukturu i svojstva čelika API 5L X80*“, Davor Kolednjak; str.141, tablica 16.

Vrijednosti spomenutih faktora su iskazane u sljedećoj tablici.³

Tablica 4. Promatrani parametri MAG zavarivanja

| Faktor | Mjerna jedinica | Niža razina (-1) | Viša razina (+1) |
|---|-----------------|------------------|------------------|
| Udio CO₂ u zaštitnom plinu Ar | % | 12 | 24 |
| Unos topline, Q | kJ/cm | 10 | 14 |
| Temperatura predgrijavanja, ϑ | °C | 45 | 115 |

Da bi se omogućila procjena parametara modela II. reda, za plan pokusa je odabran model I. reda (2^k) proširen dodatnim točkama, tj. stanjima pokusa u centru i točkama u osima.

Sastoji se od tri dijela:

- potpunog faktorskog plana pokusa s $2^k = 8$ stanja na dvije razine (+1 i -1) - točke na vrhovima
- osnog dijela koji se sastoji od $2^k = 6$ stanja – točke na osima,
- centralne točke n_0 gdje razina svakog faktora ima srednju vrijednost (0,0,0).

Broj pokusa N koji je potreban unutar ove analize je

$$N = 2^k + 2 * k + n_0 \quad (11)$$

gdje je:

k – broj faktora

n_0 – broj ponavljanja

Znači, za potreban model kompozitnog pokusa sa tri faktora potrebno je

$$N = 8 + 6 + 3$$

$$N = 17$$

sedamnaest (17) stanja pokusa.

Plan pokusa će biti određen pomoću softvera *Design Expert 7*.

³ Vrijednosti parametara MAG zavarivanja očitane iz „*Utjecaj parametara zavarivanja na strukturu i svojstva čelika API 5L X80*“, Davor Kolednjak; str.92, tablica 4.

Značajnost provedenog modela je provjerena pomoću analize varijance.

Tablica 5. Analiza varijance potpunog plana pokusa

| Response 1 Udarni rad loma metala zavara | | | | | |
|--|----------------|----|-------------|---------|------------------------|
| ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model | | | | | |
| Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III] | | | | | |
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F |
| Model | 3185.40 | 6 | 530.90 | 28.75 | < 0.0001 significant |
| A-Udio uglj dio | 1675.58 | 1 | 1675.58 | 90.73 | < 0.0001 |
| B-Unos topline | 224.66 | 1 | 224.66 | 12.16 | 0.0058 |
| C-Temp predg. | 449.34 | 1 | 449.34 | 24.33 | 0.0006 |
| BC | 262.20 | 1 | 262.20 | 14.20 | 0.0037 |
| A ² | 519.57 | 1 | 519.57 | 28.13 | 0.0003 |
| B ² | 152.69 | 1 | 152.69 | 8.27 | 0.0165 |
| Residual | 184.68 | 10 | 18.47 | | |
| Lack of Fit | 179.07 | 8 | 22.38 | 7.98 | 0.1160 not significant |
| Pure Error | 5.61 | 2 | 2.80 | | |
| Cor Total | 3370.08 | 16 | | | |

Prilikom provjere značajnosti modela, potrebno je provjeriti vrijednost „ $Prob > F$ “. Vrijednosti „ $Prob > F$ “ manje od 0,5 ukazuju da je model značajan, te se stoga mogu koristiti rezultati dobiveni njegovom analizom.

U ovom primjeru vrijednost „ $Prob > F$ “ iznosi 0,0001, te stoga zaključujemo da je model značajan.

Tada možemo pristupiti provjeri rezultata modela. Rezultat modela je predložen veličinom završni matematički model sa stvarnim faktorima.

Završni matematički model sa stvarnim faktorima iznosi:

$$KV_{MZ} = 426,74043 - 8,33194 A - 29,66671 B - 0,81754 C + 0,081786 BC + 0,18016 A^2 + 0,87900 B^2 \quad (12)$$

gdje je:

A - udio CO₂ u zaštitnom plinu Ar, %

B - unos topline, Q, kJ/cm

C - temperatura predgrijavanja, θ, °C.

6.2.2 Opis mjerenja i rezultati djelomičnog plana pokusa

U narednom poglavlju pristupa se rješavanju modela zadatka sa metodom djelomičnog plana pokusa. Potrebno je napomenuti da se radi o istom zadatku, tj. istim parametrima, te zahtjevima modela, kao što je opisano u poglavlju 6.2.1.

U ovom slučaju broj mjerenja će biti $2^{3-1} = 4$ mjerenja, za razliku od 17 potrebnih mjerenja u potpunom planu pokusa. Izvor rezultata mjerenja je također ista literatura [17].

| select | Std | Run | Factor 1 A:Udio uglj diok % | Factor 2 B:Unos topline kJ/cm | Factor 3 C:Temp predgr °C | Response 1 Udarni rad lom J |
|--------|-----|-----|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| | 2 | 1 | 24.00 | 10.00 | 45.00 | 122.1 |
| | 1 | 2 | 12.00 | 10.00 | 115.00 | 140 |
| | 3 | 3 | 12.00 | 14.00 | 45.00 | 120.7 |
| | 4 | 4 | 24.00 | 14.00 | 115.00 | 119.5 |

Slika 25. Prikaz djelomičnog plana pokusa sa rezultatima mjerenja

Nadalje, pristupa se provjeri značajnosti modela djelomičnog plana pokusa. Značajnost provedenog modela je provjerena pomoću analize varijance.

Tablica 6. Analiza varijance djelomičnog plana pokusa

| | | | | | |
|--|---------|-------------------------------|--------|-------|----------|
| Response | 1 | Udarni rad loma metala zavara | | | |
| ANOVA for selected factorial model | | | | | |
| Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III] | | | | | |
| | Sum of | | Mean | F | p-value |
| Source | Squares | df | Square | Value | Prob > F |
| Model | 189.62 | 2 | 94.81 | 1.04 | 0.5699 |
| B-Unos topline | 119.90 | 1 | 119.90 | 1.31 | 0.4566 |
| C-Temp predg. | 69.72 | 1 | 69.72 | 0.76 | 0.5426 |
| Residual | 91.20 | 1 | 91.20 | | |
| Cor Total | 280.83 | 3 | | | |

not significant

Vrijednosti „ $Prob > F$ “ manje od 0,5 ukazuju da je model značajan, te se stoga mogu koristiti rezultati dobiveni njegovom analizom.

U ovom primjeru vrijednost „ $Prob > F$ “ iznosi 0,5699, te stoga zaključujemo da model nije značajan. Izvršena je transformacija podataka. Transformacija podataka nije imala utjecaja na promjenu značajnosti modela, s obzirom da je omjer raspona minimalne i maksimalne izmjerene vrijednosti manji od 10.

Rezultati dobiveni metodom djelomičnog plana pokusa ne mogu se koristiti za donošenje zaključaka.

6.2.3 Usporedba rezultata potpunog i djelomičnog plana pokusa

Korištenje djelomičnog plana pokusa umjesto potpunog plana pokusa pruža mnoge prednosti. Djelomični planovi pokusa donose značajne uštede u području vremenskih resursa, te posljedično troškova mjerenja. S obzirom da mjerenje CT uređajem u dimenzionalnom mjeriteljstvu zahtijeva značajan utrošak vremena, što donosi za posljedicu visoke troškove, tendencija stručnjaka je smanjenje potrebnih mjerenja.

No, pronalazak balansa između dovoljnog broja mjerenja, te dovoljno kvalitetnih rezultata mjerenja, nije jednostavan.

Kao što smo vidjeli u našem primjeru, djelomični plan pokusa je donio smanjenje broja potrebnih mjerenja ($17 - 4 = 13$).

Razlika između broja mjerenja potpunog plana pokusa i djelomičnog iznosi 13 mjerenja. No, smanjenje je također prouzročilo beznačajnost sastavljenog modela.

Iz tog razloga zaključujemo da se ne može koristiti djelomičan plan pokusa kao zamjena za potpuni plan pokusa u prikazanom slučaju.

Tablica 7. Rezultati usporedbe različitih metoda planova pokusa

| Vrsta plana pokusa | Broj mjerenja | Značajnost modela ($<0,05$) |
|--------------------|---------------|-------------------------------|
| Potpuni | 17 | 0,0001 = značajan |
| Djelomični | 4 | 0,5699 = nije značajan |

Primjena metode djelomičnog plana pokusa je rezultirala modelom koji nije značajan. To jest, dobiveni skup podataka mjerenja primjenom metode djelomičnog plana pokusa nije dovoljno značajan da bi se mogli donijeti potrebni zaključci.

6.3 Primjena djelomičnog plana pokusa sa ciljem procjene sastavnice mjerne nesigurnosti

Potrebno je statističkom analizom utvrditi utjecaj parametara CT uređaja na veličine mjerene podložne pločice, konkretno na unutarnji promjer, te debljinu podložne pločice.

Industrijski CT uređaj za dimenzionalna mjerenja *XT H 225*, proizvođača *Nikon*, će se koristiti za skeniranje predmeta mjerenja.

Namještanje parametara skeniranja poput napona, struje, pozicija x, y, z, broja projekcija, itd, se odvija pomoću softvera *Inspect X*, koji se nalazi u računalu samog CT uređaja.

Koristiti će se metoda djelomičnog plana pokusa, jer pruža uštedu u broju potrebnih mjerenja. Za određivanje plana pokusa u statističkoj analizi odabrana su 3 faktora, svaki sa dvije razine. Odabrani faktori su:

- materijal predmeta mjerenja
- udaljenost predmeta mjerenja od izvora, mm
- broj projekcija.

Za potrebe ovog mjerenja iznos napona i struje, te posljedično odabrane snage će biti konstantan u sva četiri slučaja mjerenja.

Također će se izračunati iznos geometrijskog povećanja⁴. U ovom slučaju vrijednost *FOD* (udaljenost predmeta od izvora) je jedan od ulaznih faktora, dok je vrijednost *FDD* konstantna za potrebe ovog mjerenja te iznosi $FDD = 984,2712$ mm.

Za $FOD = 125$ mm, gdje je ($FDD = 984,2712$ mm);

$$M = FDD/FOD$$

$$M = 984,2712 / 125 = 7,874$$

Za $FOD = 250$ mm, gdje je ($FDD = 984,2712$ mm);

$$M = FDD/FOD$$

$$M = 984,2712 / 250 = 3,937$$

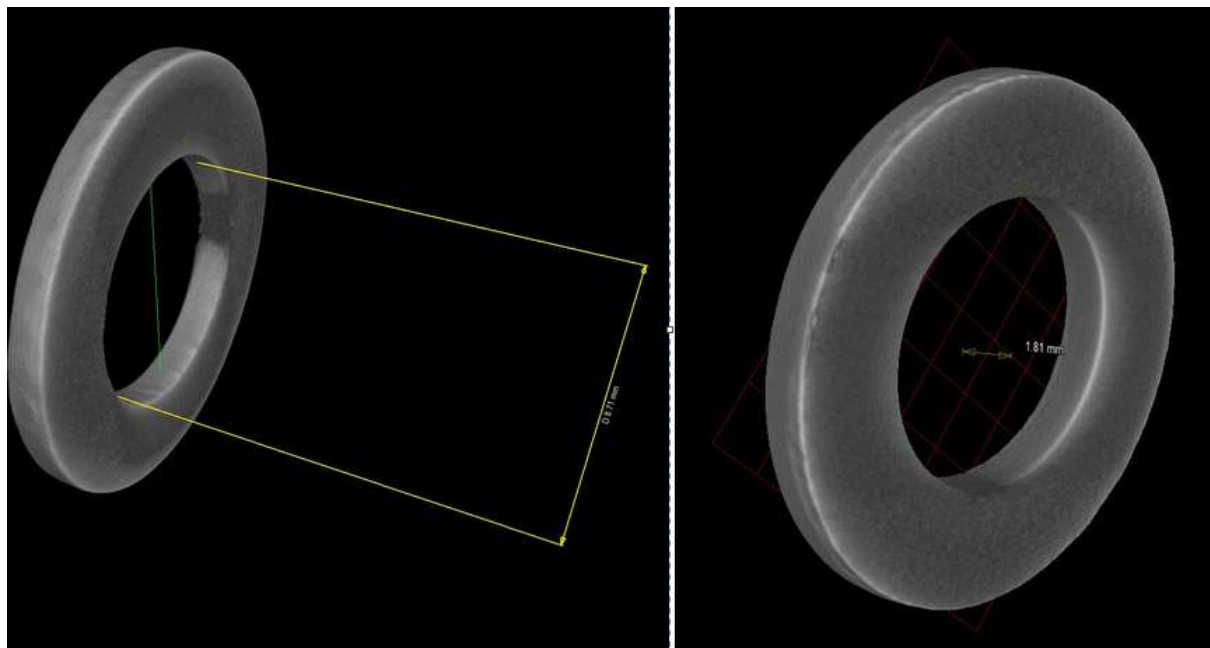
⁴ Geometrijsko povećanje: više informacija u poglavlju 4.6.1

Također, u slučaju faktora udaljenosti predmeta od izvora, radi se o pomaku predmeta po osi z koordinatnog sustava, osi x i y su konstantne.

Tablica 8. Konstantne vrijednosti u procesu mjerenja

| Veličina | Konstantni iznos |
|---|------------------|
| <i>U</i> | 130 kV |
| <i>I</i> | 30 μ A |
| <i>P</i> | 3,9 W |
| <i>FDD</i> (udalj. izvora od detektora) | 984,2712 mm |
| <i>x-os</i> | 0 |
| <i>z-os</i> | 153 mm |

Utjecaj spomenutih faktora će se analizirati na veličinama mjerene podložne pločice poput unutarnjeg promjera, te debljine podložne pločice. Posebice će se obratiti pozornost na utjecaj vrste materijala podložne pločice na rezultat mjerenja. Za validnu usporedbu utjecaja vrste materijala na rezultat mjerenja, potrebno je osigurati uvjet pločica različitog materijala, ali jednakih dimenzija.



Slika 26. Podložna pločica, lijeva slika (unutarnji promjer D), te desna slika (debljina pločice d)

Vrijednosti spomenutih faktora su iskazane u sljedećoj tablici.

Tablica 9. Vrijednosti ulaznih faktora

| Faktor | Vrsta faktora | Mjerna jedinica | Niža razina (-1) | Viša razina (+1) |
|--------------------------------------|---------------|-----------------|------------------|------------------|
| Materijal | kategorički | / | Mesing | Čelik |
| Udaljenost predmeta od izvora | numerički | mm | 125 | 250 |
| Broj projekcija | numerički | / | 360 | 720 |

6.3.1 Oblikovanje plana pokusa

Prvi korak je izrada plana pokusa. Koristiti će se djelomični 2^{3-1} plan pokusa. Takav plan pokusa omogućuje provođenje manjeg broja mjerenja.

Primjerice, korištenje potpunog plana pokusa bi zahtijevalo $2^3 = 8$ potrebnih mjerenja. Uporabom ovakve vrste djelomičnog plana pokusa, broj zahtijevanih mjerenja je $2^{3-1} = 2^2 = 4$ mjerenja.

Plan pokusa će biti određen pomoću softvera *Design Expert 7*.

Slijedi prikaz dobivenog plana pokusa navedenim softverom.

| Select | Std | Run | Factor 1 A:Materijal | Factor 2 B:Udaljenost p | Factor 3 C:Broj projekci | Response 1 Unutarnji promj mm | Response 2 Debljina mm |
|--------|-----|-----|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| | 2 | 1 | celik | 125.00 | 360.00 | | |
| | 3 | 2 | mesing | 250.00 | 360.00 | | |
| | 1 | 3 | mesing | 125.00 | 720.00 | | |
| | 4 | 4 | celik | 250.00 | 720.00 | | |

Slika 27. Plan pokusa potreban za mjerenja na CT uređaju

Mjerenja podložne pločice su obavljena na CT uređaju *XT H 225*, te je 3D model izrađen pomoću softvera *3D CT Pro*.

Rezultati mjerenja su prikazani u sljedećoj tablici. Dimenzionalna mjerenja izrađenog 3D modela su dobivena pomoću softvera *Volume Graphics Studio MAX 2.2*.

Tablica 10. Rezultati mjerenja podložne pločice

| Br. Mjerenja | Faktor 1: Materijal | Faktor 2: Udaljenost predmeta od izvora, mm | Faktor 3: Broj projekcija | Izlazna veličina 1: Unutarnji promjer pločice, mm | Izlazna veličina 2: Debljina, mm |
|-------------------|------------------------|--|------------------------------|---|--|
| <i>Mjerenje_1</i> | čelik | 125 | 360 | 8,60 | 1,92 |
| <i>Mjerenje_2</i> | mesing | 250 | 360 | 8,71 | 1,73 |
| <i>Mjerenje_3</i> | mesing | 125 | 720 | 8,68 | 1,72 |
| <i>Mjerenje_4</i> | čelik | 250 | 720 | 8,62 | 1,92 |

Rezultati mjerenja su nadalje uvršteni u softver *Design Expert 7*.

| Select | Std | Run | Factor 1 A:Materijal | Factor 2 B:Udaljenost p | Factor 3 C:Broj projekci | Response 1 Unutarnji promj mm | Response 2 Debljina mm |
|--------|-----|-----|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| | 2 | 1 | celik | 125.00 | 360.00 | 8.6 | 1.92 |
| | 3 | 2 | mesing | 250.00 | 360.00 | 8.71 | 1.73 |
| | 1 | 3 | mesing | 125.00 | 720.00 | 8.68 | 1.72 |
| | 4 | 4 | celik | 250.00 | 720.00 | 8.62 | 1.92 |

Slika 28. Rezultati mjerenja prikazani u softveru *Design Expert 7*

Iz rezultata je vidljivo da je mjerenje podložne pločice kod istih materijala pružilo gotovo identične vrijednosti.

Razlika unutarnjeg promjera čelične pločice na udaljenosti od 125 mm i 250 mm iznosi,

$$Mjerenje_4 - Mjerenje_1 = 8,62 - 8,60 = 0,02 \text{ mm.}$$

Dok su vrijednosti debljine čelične pločice identične te iznose,

$$Mjerenje_4 = Mjerenje_1 = 1,92 \text{ mm.}$$

Razlika unutarnjeg promjera pločice od materijala mesinga na udaljenosti od 125 mm i 250 mm iznosi,

$$Mjerenje_2 - Mjerenje_3 = 8,71 - 8,68 = 0,03 \text{ mm.}$$

Dok je razlika vrijednosti debljine pločice od mesinga sljedeća,

$$Mjerenje_2 - Mjerenje_3 = 1,73 - 1,72 = 0,01 \text{ mm.}$$

Utjecaj vrste materijala na unutarnji promjer je vidljiv na sljedećoj tablici. Provedeno mjerenje pločice od mesinga je rezultiralo višim vrijednostima izmjerenog unutarnjeg promjera pločice u odnosu na pločicu od čelika.

Tablica 11. Razlika vrijednosti unutarnjeg promjera u odnosu na vrstu materijala

| Vrsta materijala | Prosječna vrijednost mjerenja unutarnjeg promjera, mm | Razlika, mm |
|------------------|---|----------------------------|
| mesing | 8,695 | $8,685_M - 8,61_C = 0,085$ |
| čelik | 8,61 | |

Mjerenje podložne pločice od mesinga je rezultiralo rezultatom mjerenja (unutarnji promjer pločice) većim za 0,085 mm od mjerenja pločice od čelika.

Utjecaj vrste materijala na debljinu pločice je vidljiv na sljedećoj slici. Provedeno mjerenje pločice od čelika je rezultiralo višim vrijednostima izmjerene debljine pločice u odnosu na pločicu od mesinga.

Tablica 12. Razlika vrijednosti debljine u odnosu na vrstu materijala

| Vrsta materijala | Prosječna vrijednost mjerenja debljine pločice, mm | Razlika, mm |
|------------------|--|----------------------------|
| mesing | 1,725 | $1,92_C - 1,725_M = 0,195$ |
| čelik | 1,92 | |

Provedeno mjerenje podložne pločice od mesinga je rezultiralo rezultatom mjerenja debljine pločice manjim za 0,195 mm od mjerenja pločice od čelika

Razlika utjecaja vrste materijala je izraženija kod rezultata mjerenja debljine podložne pločice, nego kod rezultata mjerenja unutarnjeg promjera podložne pločice.

Razlika izmjerene debljine pločice > Razlika izmjerenog unutarnjeg promjera

$$0,195 \text{ mm} > 0,085 \text{ mm}$$

6.3.2 Statistička analiza

Statistička analiza se provodi pomoću računalnog programa *Design Expert 7*. Tim računalnim programom su izrađeni modeli za opisivanje utjecaja ulaznih faktora na mjerenu veličinu. Prikladnost dobivenih modela utvrđuje se pomoću F-testa kao i pomoću maksimalne vrijednosti koeficijenta determinacije, tj. prilagođenog i predviđenog koeficijenta determinacije. Značajnost modela i članova odzivnog polinoma se određuje analizom varijance⁵.

6.3.2.1 Unutarnji promjer podložne pločice

Pristupa se provjeri značajnosti modela djelomičnog plana pokusa. Značajnost provedenog modela je provjerena pomoću analize varijance.

Tablica 13. Analiza varijance za unutarnji promjer pločice

| Response 1 Unutarnji promjer | | | | | |
|--|----------------|----|-------------|------------|------------------------|
| ANOVA for selected factorial model | | | | | |
| Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III] | | | | | |
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F |
| Model | 6.500E-004 | 2 | 3.250E-004 | 0.045 | 0.9578 not significant |
| B-Udaljenost p | 6.250E-004 | 1 | 6.250E-004 | 0.087 | 0.8179 |
| C-Broj projekc | 2.500E-005 | 1 | 2.500E-005 | 3.460E-003 | 0.9626 |
| Residual | 7.225E-003 | 1 | 7.225E-003 | | |
| Cor Total | 7.875E-003 | 3 | | | |

Vrijednosti „ $Prob > F$ “ manje od 0,5 ukazuju da je model značajan, te se stoga mogu koristiti rezultati dobiveni njegovom analizom.

U ovom primjeru vrijednost „ $Prob > F$ “ iznosi 0,9578, te stoga zaključujemo da model nije značajan. Izvršena je transformacija podataka. Transformacija podataka nije imala utjecaja na promjenu značajnosti modela, s obzirom da je omjer raspona minimalne i maksimalne izmjerene vrijednosti manji od 10.

⁵ Analiza varijance (ANOVA) je tehnika upotrebe razlika između prosjeka uzoraka u zaključivanju o postojanju ili nepostojanju razlika između prosjeka razlika. Postupak kojim je moguće raščlaniti i procijeniti varijabilnosti uvjetovane različitim čimbenicima.

Rezultati mjerenja unutarnjeg promjera, dobiveni metodom djelomičnog plana pokusa, ne mogu se koristiti za donošenje zaključaka.

6.3.2.2 Debljina podložne pločice

Pristupa se provjeri značajnosti modela djelomičnog plana pokusa. Značajnost provedenog modela je provjerena pomoću analize varijance.

Tablica 14. Analiza varijance za debljinu pločice

| | | | | | | |
|--|------------|----------|------------|------------|----------|-----------------|
| Response | 2 | Debljina | | | | |
| ANOVA for selected factorial model | | | | | | |
| Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III] | | | | | | |
| | Sum of | Mean | F | p-value | | |
| Source | Squares | df | Square | Value | Prob > F | |
| Model | 5.000E-005 | 2 | 2.500E-005 | 6.575E-004 | 0.9993 | not significant |
| B-Udaljenost p | 2.500E-005 | 1 | 2.500E-005 | 6.575E-004 | 0.9837 | |
| C-Broj projekc | 2.500E-005 | 1 | 2.500E-005 | 6.575E-004 | 0.9837 | |
| Residual | 0.038 | 1 | 0.038 | | | |
| Cor Total | 0.038 | 3 | | | | |

Vrijednosti „ $Prob > F$ “ manje od 0,5 ukazuju da je model značajan, te se stoga mogu koristiti rezultati dobiveni njegovom analizom.

U ovom primjeru vrijednost „ $Prob > F$ “ iznosi 0,9993, te stoga zaključujemo da model nije značajan. Izvršena je transformacija podataka. Transformacija podataka nije imala utjecaja na promjenu značajnosti modela, s obzirom da je omjer raspona minimalne i maksimalne izmjerene vrijednosti manji od 10.

Rezultati mjerenja debljine, dobiveni metodom djelomičnog plana pokusa, ne mogu se koristiti za donošenje zaključaka.

Tablica 15. Značajnost modela za mjerenje unutarnjeg promjera i debljine pločice

| Vrsta plana pokusa | Broj mjerenja | Mjerenje | Značajnost modela ($< 0,05$) |
|--------------------|---------------|-------------------|-----------------------------------|
| Djelomični | 4 | unutarnji promjer | 0,9578 = nije značajan |
| Djelomični | 4 | debljina | 0,9993 = nije značajan |

Model djelomičnog plana pokusa korišten za mjerenje unutarnjeg promjera podložne pločice je beznačajan. Tj. dobiveni skup podataka mjerenja primjenom metode djelomičnog plana pokusa nije dovoljno značajan da bi se mogli donijeti potrebni zaključci.

Model djelomičnog plana pokusa korišten za mjerenje debljine podložne pločice je beznačajan. Tj. dobiveni skup podataka mjerenja primjenom metode djelomičnog plana pokusa nije dovoljno značajan da bi se mogli donijeti potrebni zaključci.

6.3.3 Procjena sastavnice standardne nesigurnosti rezultata mjerenja

Procjena standardne nesigurnosti rezultata mjerenja unutarnjeg promjera i debljine podložne pločice je provedena sukladno novoj reviziji Vodiča za procjenu mjerne nesigurnosti JCGM 100 : 201X CD.

Vodič za procjenu mjerne nesigurnosti je posljednji put izmijenjen 2008. godine. Nova revizija JCGM 100:201X uvodi sasvim novi pristup u procjeni mjerne nesigurnosti s ciljem rješavanja problema procjene mjerne nesigurnosti u situacijama koje nisu obuhvaćene u sadašnjoj JCGM 100:2008 verziji Vodiča.

U sadašnjoj verziji Vodiča, standardna nesigurnost se računa prema izrazu

$$u(x_i) = \frac{s_i}{\sqrt{n}} \quad (13)$$

Sukladno novoj reviziji Vodiča standardna nesigurnost izračunata na osnovu $n = 20$ rezultata mjerenja uvećana je za 5,7 % u odnosu na verziju Vodiča iz 2008 [19].

Standardna nesigurnost se zasniva na bilo kojoj vrijedećoj statističkoj metodi. Primjerice, to su računanje standardnog odstupanja srednje vrijednosti mjernog niza, primjena metode najmanjih kvadrata odstupanja, te analiza varijance (ANOVA).

U ovom radu postupak procjene standardne nesigurnosti se zasniva na analizi varijance.

Na temelju izmjerenog skupa podataka potrebno je procijeniti standardnu nesigurnost unutarnjeg promjera pločice $u(D)$, te standardnu nesigurnost debljine pločice $u(d)$.

Podaci potrebni za izračun standardne mjerne nesigurnosti su dobiveni računalnim programom *Design Expert 7*.

Podatak potreban za izračun standardne nesigurnosti mjerenih veličina je standardno odstupanje za svaki skup podataka, tj. s_i .

Sukladno novoj reviziji Vodiča [18], standardna nesigurnost za minimalan broj mjerenja $n = 4$ se procjenjuje prema izrazu:

$$u(x_i) = \left(\frac{n-1}{n-3}\right)^{1/2} \cdot \frac{s_i}{\sqrt{n}} \quad (14)$$

gdje je:

n – broj izvršenih mjerenja u pokusu

s_i – standardno odstupanje

6.3.3.1 Procjena mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja unutarnjeg promjera pločice

Podaci potrebni za izračun standardne nesigurnosti su dobiveni korištenjem gore navedenog softvera.

Tablica 16. Statistički prikaz rezultata mjerenja unutarnjeg promjera pločice

| Design Summ | | | | | | | | | | | |
|----------------|------------------|-------------------|-----------|------------|-------------|-----------|------------|-----------|-----------|-------|---------------|
| Study Type | | Factorial | | Runs | | 4 | | | | | |
| Initial Design | | 2 Level Factorial | | Blocks | | No Blocks | | | | | |
| Center Points | | 0 | | | | | | | | | |
| Design Model | | Main effects | | | | | | | | | |
| Factor | Name | Units | Type | Low Actual | High Actual | Low Coded | High Coded | Mean | Std. Dev. | | |
| A | Materijal | | Categoric | mesing | celik | | | Levels: | 2 | | |
| B | Udaljenost predr | | Numeric | 125.00 | 250.00 | -1.000 | 1.000 | 187.500 | 62.500 | | |
| C | Broj projekcija | | Numeric | 360.00 | 720.00 | -1.000 | 1.000 | 540.000 | 180.000 | | |
| Response | Name | Units | Obs | Analysis | Minimum | Maximum | Mean | Std. Dev. | Ratio | Trans | Model |
| Y1 | Unutarnji promje | mm | 4 | Factorial | 8.6 | 8.71 | 8.6525 | 0.0443706 | 1.01279 | None | RMain effects |
| Y2 | Debljina | mm | 4 | Factorial | 1.72 | 1.92 | 1.8225 | 0.0975641 | 1.11628 | None | RMain effects |

Izračunato standardno odstupanje za skup podataka rezultata mjerenja unutarnjeg promjera je:

$$s_i = 0,0443706 \text{ mm}$$

Standardno odstupanje mjerenja unutarnjeg promjera iznosi:

$$s_i = 0,044 \text{ mm}$$

Sukladno izrazu (14) standardna nesigurnost za rezultat mjerenja unutarnjeg promjera pločice iznosi:

$$u(D) = 0,038 \text{ mm}$$

6.3.3.2 Procjena mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja debljine pločice

Podaci potrebni za izračun standardne nesigurnosti su dobiveni korištenjem gore navedenog softvera.

Tablica 17. Statistički prikaz rezultata mjerenja debljine podložne pločice

| | | | | | | | | | | | |
|----------------|----------------------|-------|-------------|------------|-------------|-----------|------------|-----------|-----------|-------|---------------|
| Design Summary | | | | | | | | | | | |
| Study Type | Factorial | | | Runs | 4 | | | | | | |
| Initial Design | 2 Level Factorial | | | Blocks | No Blocks | | | | | | |
| Center Points | 0 | | | | | | | | | | |
| Design Model | Main effects | | | | | | | | | | |
| Factor | Name | Units | Type | Low Actual | High Actual | Low Coded | High Coded | Mean | Std. Dev. | | |
| A | Materijal | | Categorical | mesing | celik | | | Levels: | 2 | | |
| B | Udaljenost predr | | Numeric | 125.00 | 250.00 | -1.000 | 1.000 | 187.500 | 62.500 | | |
| C | Broj projekcija | | Numeric | 360.00 | 720.00 | -1.000 | 1.000 | 540.000 | 180.000 | | |
| Response | Name | Units | Obs | Analysis | Minimum | Maximum | Mean | Std. Dev. | Ratio | Trans | Model |
| Y1 | Unutarnji promjer mm | | 4 | Factorial | 8.6 | 8.71 | 8.6525 | 0.0443708 | 1.01279 | None | RMain effects |
| Y2 | Debljina | mm | 4 | Factorial | 1.72 | 1.92 | 1.8225 | 0.0975641 | 1.11626 | None | RMain effects |

Izračunato standardno odstupanje za skup podataka rezultata mjerenja debljine je:

$$s_i = 0,0975641 \text{ mm}$$

Standardno odstupanje mjerenja debljine iznosi:

$$s_i = 0,097 \text{ mm}$$

Sukladno izrazu (14) standardna nesigurnost za rezultat mjerenja debljine pločice iznosi:

$$u(d) = 0,084 \text{ mm}$$

6.3.3.3 Usporedba mjernih nesigurnosti unutarnjeg promjera i debljine pločice

Dobivene sastavnice standardne nesigurnosti dviju veličina podložne pločice su:

Tablica 18. Sastavnica standardne nesigurnosti rezultata mjerenja

| Veličina podložne pločice | Srednja vrijednost \bar{x} , mm | Standardna odstupanje s_i , mm | Sastavnica standardne nesigurnosti $u(x_i)$, mm |
|---------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--|
| Unutarnji promjer | 8,652 | 0,044 | 0,038 |
| Debljina | 1,822 | 0,097 | 0,084 |

Sastavnica standardne nesigurnosti unutarnjeg promjera podložne pločice iznosi $u(D) = 0,038$ mm.

Sastavnica standardne nesigurnosti debljine podložne pločice iznosi $u(d) = 0,084$ mm,

7. ZAKLJUČAK

Industrijski CT uređaji imaju značajnu ulogu u području dimenzionalnog mjeriteljstva. Mogućnost mjerenja unutarnje geometrije predmeta, bez razaranja integriteta i strukture istog predmeta, predstavlja najvažniju prednost njihovog korištenja.

No, primjena CT uređaja je još uvijek neraširena u području dimenzionalnog mjeriteljstva. Kao najznačajniji nedostatak metode, ističe se izostanak mjerne sljedivosti rezultata. Posebice je važna uloga utjecaja parametara CT sustava na njegove performanse koja je u ranim stadijima istraživanja, te stoga predstavlja veliku nepoznanicu. S obzirom da mjerenje CT uređajem u dimenzionalnom mjeriteljstvu donosi za posljedicu visoke troškove i utrošak vremena, tendencija stručnjaka je smanjenje potrebnih mjerenja.

Djelomični plan pokusa predstavlja prikladan tip metode za planiranje pokusa kod ispitivanja utjecaja parametara CT uređaja, s obzirom da se utjecaj parametara CT uređaja nalazi u fazi verifikacijske analize. Verifikacijska analiza se izvodi u ranoj fazi pokusa, kada se uzima velik broj parametara u obzir, te se postupno odvajaju oni parametri bez stvarnog utjecaja na konačni rezultat pokusa. Upravo je činjenica nepoznatog utjecaja velikog broja parametara CT uređaja na njegov rad jedan od glavnih nedostataka njegovog korištenja.

Korištenjem djelomičnog plana pokusa, omogućit će se odvajanje parametara sa velikim utjecajem na rezultat pokusa, te pružiti kvalitetniji temelj za naknadna istraživanja. Djelomični planovi pokusa također donose značajne uštede financijskih i vremenskih resursa.

No, kao što je prikazano primjerima, djelomični planovi pokusa nisu primjenjivi u svim slučajevima.

Neprimjenjivost djelomičnih planova pokusa u ovom slučaju, ne utječe na postupak procjene sastavnica standardne nesigurnosti izmjerenih veličina.

Postupak procjene sastavnica standardne nesigurnosti izmjerenih veličina je proveden sukladno novoj reviziji Vodiča za procjenu mjerne nesigurnosti JCGM 100 : 201X CD.

Za donošenje kvalitetnijih zaključaka u vezi utjecaja promatranih parametara na rezultate mjerenja podložne pločice, potreban je puno veći broj provedenih mjerenja predmeta mjerenja, nego što je provedeno u ovom radu.

LITERATURA

1. J.P. Kruth , M. Bartscher, S. Carmignato, R. Schmitt , L. De Chiffre , A. Weckenmann: *“ Computed tomography for dimensional metrology ”*, 2011.
2. Bartosz Gapinski, Michał Wieczorowski, Lidia Marciniak-Podsadna, Bogdan Dybala, Grzegorz Ziolkowski: *„Comparison of Different Method of Measurement Geometry using CMM, Optical Scanner and Computed Tomography 3D”*, 2014.
3. Angela Cantatore, Pavel Müller: *„Introduction to computed tomography”*, 2011.
4. *„Međunarodni mjeriteljski rječnik – Osnovni i opći pojmovi i pridruženi nazivi (VIM) ”*, Državni zavod za mjeriteljstvo, 2009.
5. Pavel Muller: *„Influence parameters in CT scanning”*, 2011.
6. Douglas C. Montgomery; George C. Runger: *„Applied statistics and probability for engineers”*, 2011.
7. Schmitt R., Hafner P., Pollmanns S.: *„Artefaktreduzierung in tomographischen Aufnahmen mittels Bilddatenfusion. Proc. Sensoren und Messsysteme”*, 2008.
8. P. Wenig, S. Kasperl: *„Examination of the measurement uncertainty on dimensional measurements by x-ray computed tomography”*, *Proceedings of 9th European Congress on Non-Destructive Testing*, Berlin, Germany, 2006.
9. F. Welkenhuyzen, K. Kiekens, M. Pierlet, W. Dewulf, P. Bleys, J.-P. Kruth, A. Voet: *„Industrial computer tomography for dimensional metrology: Overview of influence factors and improvement strategies”*, *4th International Conference on Optical Measurement Techniques for Structures and Systems (OPTIMESS2009)*, Antwerp, Belgium, 2009.
10. M. Reiter, C. Heinzl, D. Salamberger, D. Weiss, J. Kastner: *„Study on parameter variation of an industrial computed tomography simulation tool concerning dimensional measurements deviations”*, *10th European conference on non-destructive testing (ECNDT)*, Moscow, Russia, 2010.
11. A. Weckenmann, P. T. Krämer: *„Predetermination of measurement uncertainty in the application of computed tomography”*, *11th CIRP International Conference on Computer Aided Tolerancing*, Annecy, France, 2009.
12. Sun W., Brown S. B., Leach R. K.: *„An overview of industrial X-ray computed tomography”*, 2012.
13. <http://info.blockimaging.com/bid/99019/The-Best-CT-Scan-Room-Temperature-and-Humidity-for-Maximum-Uptime>
14. <http://www.acoustics-vibrations.com/MRICTScannrSiteVibrnEvalnContrl.aspx>

15. Myers; Montgomery; Anderson-Cook: „*Response surface methodology*“; 2009.
16. Simone Carmignato: „*Industrial x-ray computed tomography: The future of co-ordinate metrology?*“, Loughborough University, 11 April 2012.
17. Davor Kolednjak: „*Utjecaj parametara zavarivanja na strukturu i svojstva čelika API 5L X80*“, 2014.
18. Vodič za procjenu mjerne nesigurnosti JCGM 100 : 201X CD
19. JCGM 100 201X CD, Evaluation of measurement data | Guide to uncertainty in measurement, Committee draft

PRILOZI

I. CD-R disc